

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»

На правах рукописи



Мироненко Владимир Витальевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЭЛАСТИЧНОЙ
СРЕДОЙ ЭЛЕМЕНТА ТИПА "ПОДСЕЧКА" НА ЛИСТОВЫХ
ЗАГОТОВКАХ ПОДВИЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ОСНАСТКИ**

Специальность 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство
летательных аппаратов»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
кафедры нефтегазового дела
Шмаков А. К.

Иркутск - 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Состояние вопроса	5
1.1 Общая характеристика процесса формообразования подсечки	5
1.2 Обзор теоретических исследований формообразования подсечки	12
1.3 Краткие выводы. Задачи исследования	20
2. Разработка математической модели расчета основных технологических параметров процесса формообразования	23
2.1 Основные теоретические положения	24
2.2 Анализ детали №1	28
2.3 Анализ детали №2	30
2.4 Анализ детали №3	52
2.5 Выводы	74
3. Верификация предложенных математических моделей с моделированием процесса формообразования методом конечных элементов	75
3.1 Описание метода конечных элементов	75
3.2 Описание метода конечных элементов в реализации программного комплекса PAM-STAMP 2G	84
3.3 Моделирования формообразования детали №2	92
3.4 Моделирования формообразования детали №3	104
3.5 Выводы	116
4. Натурные эксперименты, опытные работы и анализ изменение параметров по номограмме	117
4.1 Пресс для формообразования и блок эластоформования	124
4.2 Натурный эксперимент детали №2 и №3 и анализ результатов	133
4.3 Анализ деталей №2 при изменении параметров номограммы	145
4.4 Анализ деталей №3 при изменении параметров номограммы	161
4.5 Натурный эксперимент на детали из трудно-деформируемого сплава	175
4.6 Выводы	187
Заключение	188
Список литературы	191

ВВЕДЕНИЕ

Листовая штамповка является одной из основных разновидностей обработки металлов давлением, которая позволяет получать плоские и пространственные детали самых разнообразных материалов и конфигураций. Тонкостенные конструкции из листа получают широкое применение в самых разнообразных изделиях машиностроения. Высокие эксплуатационно-прочностные качества тонкостенных деталей и узлов из листа при минимальном весе последних определяют еще большее их применение в изделиях машиностроения. В связи с этим экономичное и высокопроизводительное производство качественных тонкостенных деталей, особенно сложных форм, является одной из важных проблем современного машиностроения. Большое значение приобретает совершенствование существующих и разработка новых процессов штамповки деталей из листа.

За последние годы комплекс ранее разработанных и применяемых в машиностроительном производстве методов листовой штамповки (штамповка-вытяжка, гибка, резка, формовка в жестких штампах, частично простейшие процессы штамповки жидкостью, резиной и др.) пополнился большим количеством новых совершенных процессов, создающих реальную базу для активного развития различных отраслей машиностроительного производства. Если процессы листовой штамповки расположить последовательно по виду применяемой деформирующей среды, то в этом ряду особое место займут процессы штамповки эластичными и жидкостными средами, т. е. высокоплотными податливыми средами (штамповка резиной, эластичными пластиками типа полиуританов, жидкостью и др.).

Процессы листовой штамповки эластичной и жидкостной средой вследствие их универсальности, удобства осуществления, простоты используемого при этом инструмента, а также исключительно больших технологических возможностей обеспечивают значительное снижение себестоимости, повышение качества и надежности промышленной продукции не

только при массовом, но и серийном, мелкосерийном и опытно-конструкторском производстве. Можно с уверенностью сказать, что существование современного машиностроения практически невозможно без широкого применения процессов листовой штамповки эластичными и жидкостными средами и в первую очередь процессов штамповки резиной и жидкостью

Такое широкое применение эластоформования обусловлено возможностью изготовления сложных по конфигурации, легких и прочных деталей с высоким коэффициентом использования материала. В ряде случаев штамповка позволяет избежать трудоёмких операций сборки за счёт исполнения дополнительных конструктивных элементов (подсечки, рифты, подштамповки лючки) на крупногабаритных деталях планера.

Наиболее распространенным способом изготовления листовых деталей является формообразование эластичной средой. Однако этот способ не всегда может обеспечить эффективное получение деталей с высокими требованиями по качеству и точности, характерными для изделий оборонного комплекса. Получение деталей с устранимыми дефектами приводит к появлению ручных доводочных работ, а с не устранимыми дефектами к отправлению детали в брак.

Формообразование деталей с разными конструктивными элементами как в плоскости стенки, так и на бортах приводит к появлению дефектов. Наиболее распространённым элементом жесткости и элементом, обеспечивающим стыковку деталей при сборке, является подсечка.

1. Состояние вопроса

1.1. Общая характеристика процесса формообразования подсечки

Подсечка - наиболее распространённый и сложный конструктивный элемент деталей, штампуемый эластичной средой.

Подсечки разделяют на плоские (см.Рисунок 1.1 а) и боковые (см.Рисунок 1.1 в).

Основными характеристиками подсечки являются (см.Рисунок 1.1 в):

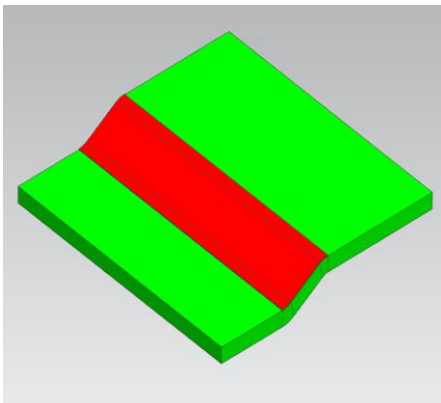
L – величина сбегса подсечки;

S – толщина материала заготовки;

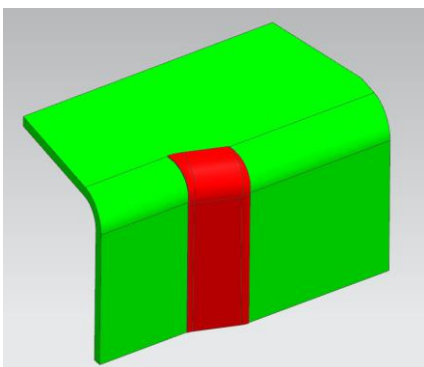
h – высота (глубина) подсечки;

r – радиус инструмента;

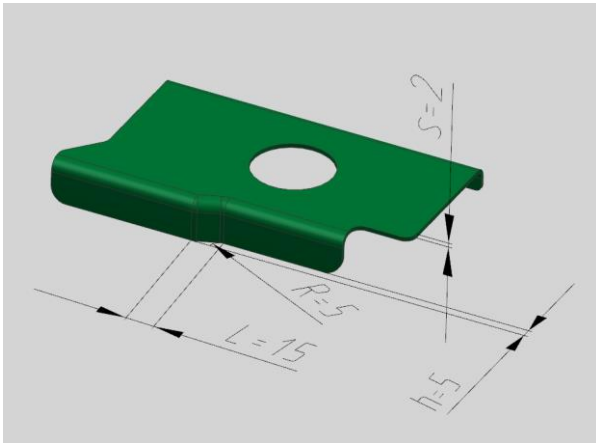
$h/L = K$ – крутизна подсечки.



а)



б)



в)

а) плоские подсечки; б) боковые подсечки; в) основные характеристики подсечек

Рисунок 1.1 – Виды подсечек и параметры подсечки

При формообразовании боковых подсечек возникают следующие основные дефекты:

- гофрообразование;
- недоштамповка;
- разрыв в вершине.

Соотношение характеристик подсечки влияет на появление того или иного дефекта или, наоборот, исключает его появление. В нормативном документе [52] существует номограмма (см.Рисунок 1.2) , показывающая рекомендуемые области соотношений характеристик для формообразования подсечки. Графики на рисунке показывают области подсечек без дефектов для материалов АМг2М - АМг6М, Д16М, Д19М, В95М, 1201, 1420 при радиусе инструмента $r = 2S$.

При формообразовании подсечки могут возникнуть три дефекта: гофрообразование (С); недоштамповка (Н); разрыв (Р). Данная номограмма также содержит зоны увеличения вероятности появления дефектов. Вероятность появления недоштамповки увеличивается, когда возрастает толщина заготовки и, следовательно, уменьшается отношение h/S . Вероятность появления дефекта типа гофра увеличивается с уменьшением толщины заготовки и, следовательно,

с ростом отношения h/S . Вероятность появления разрывов увеличивается с увеличением крутизны подсечки, т.е. отношения h/l .

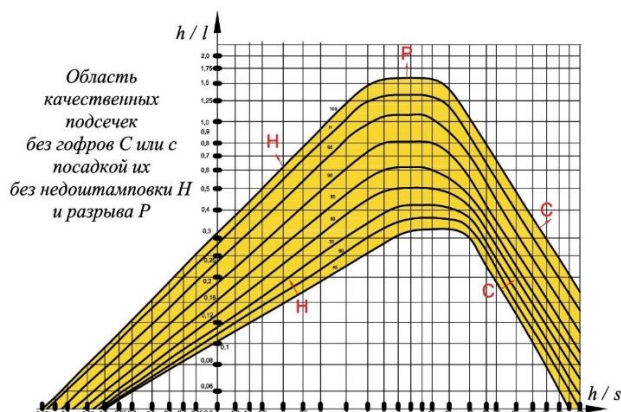


Рисунок 1.2 – Предельная крутизна срединных подсечек при штамповке резиной на свободных формблоках

Однако, при использовании данной номограммы и нормативной документации можно столкнуться со следующими проблемами:

- 1) геометрические характеристики подсечки не входят в рекомендованные зоны;
- 2) использован материал для детали, который не входит в состав перечисленных для рекомендованных параметров подсечек;
- 3) имеется вероятность появления устранимых дефектов (гофрообразование и недоштамповка) при рекомендованных параметрах в связи с возникновением ряда неконтролируемых факторов (например, изменение свойств материала ввиду разности поставок), что приводит к необходимости их устранения с применением ручной доводки;
- 4) недостаточность давления оборудования для обеспечения качественного формообразования подсечки с рекомендованными параметрами.

В нормативном документе [51] указаны способы предотвращения гофрообразования и недоштамповки при формообразовании подсечек эластичной средой:

- использование дополнительного элемента оснастки – неподвижная прижимная опора;
- изменение геометрических параметров подсечки в районе ее вершины.

Прижимная опора (см.Рисунок 1.3) обеспечивает на ранних этапах формообразования расположение очага деформации на вершинах подсечки, что позволяет исключить эффект появления повышенной жесткости в данном месте, характерной для обычного формообразования. Прижимная опора имеет наклон для уменьшения деформации от касания с ней. Аналогично этому рекомендуется использовать прижимную опору уменьшенной высоты для перемещения очага деформации вниз поперёк подсечки. Такой многопереходный процесс обеспечивает отсутствие появления гофрообразования.

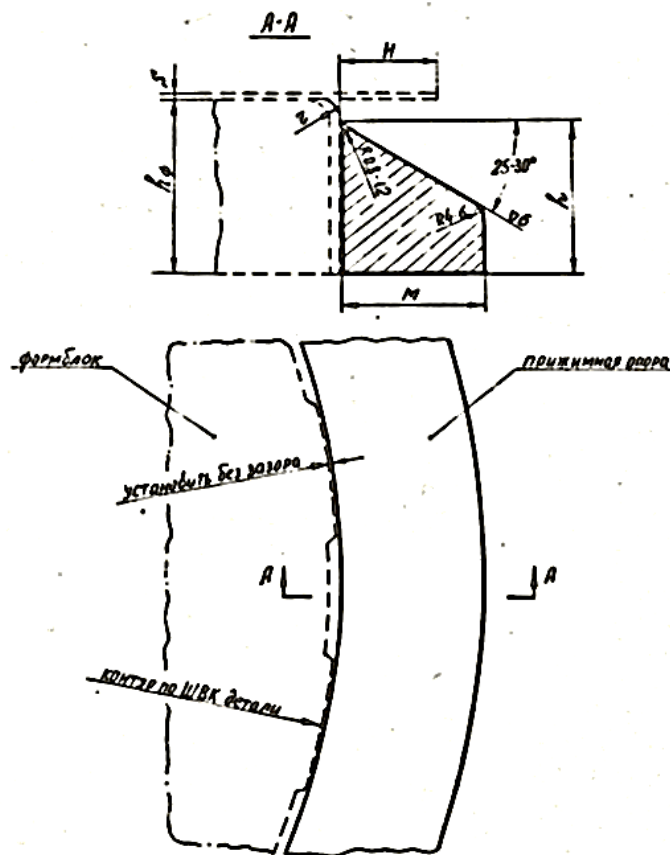
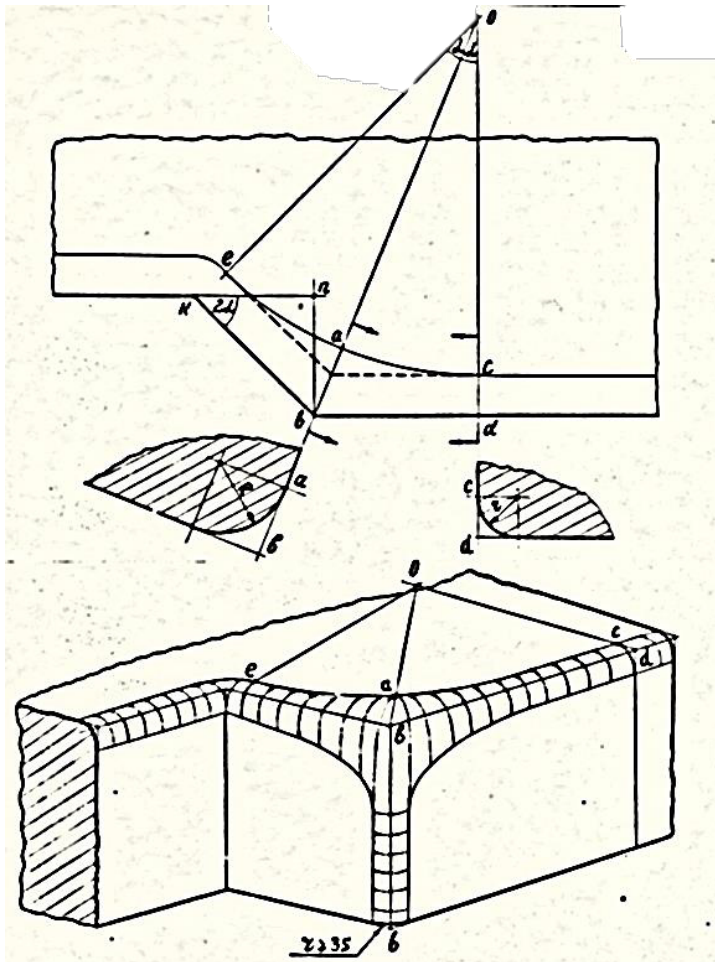


Рисунок 1.3 – Неподвижная прижимная опора

Для устранения дефекта недоштамповка, который появляется в зонах вершины подсечки, рекомендуется изменить форму сопряжения радиусов в этой зоне. Это необходимо так как локализуя деформации на этом месте с помощью прижимной опоры, усилие, создаваемое эластичной средой, локализуется на малом участке и чем он меньше, тем выше вероятность разрыва или увеличения утонения. При штамповке разрыва не происходит в результате повышения

жесткости в данном месте, но исключается полное оформление геометрии и, следовательно, получение недоштаповки. При использовании эластичной среды и прижимной опоры повышение жесткости не происходит т.к. формируется борт не прямой, а с открытой малкой и данный эффект не дает появления достаточной жесткости в данном месте.

Для предотвращения недоштаповки, разрыва и чрезмерного утонения форма сопряжений в месте вершины подсечки меняется (см. рисунок 4).



r - минимальный радиус сгиба на 90° материала заготовки;

R - радиус округления формблока в плоскости obb ;

eac - линия сопряжения поверхности формблока с радиусом $R \div r$;

$OC = 3h$ - принятый радиус в плане линии сопряжения eac ;

$bn = h$ - глубина подсечки;

$kn = h$ - сбег подсечки.

Рисунок 1.4 - Схема формообразования

Нормативный документ [51] рекомендует величину R и bd для определения геометрических характеристик сопряжения вычислять по формулам (1.1), (1.2), зависящим от основных характеристик подсечек:

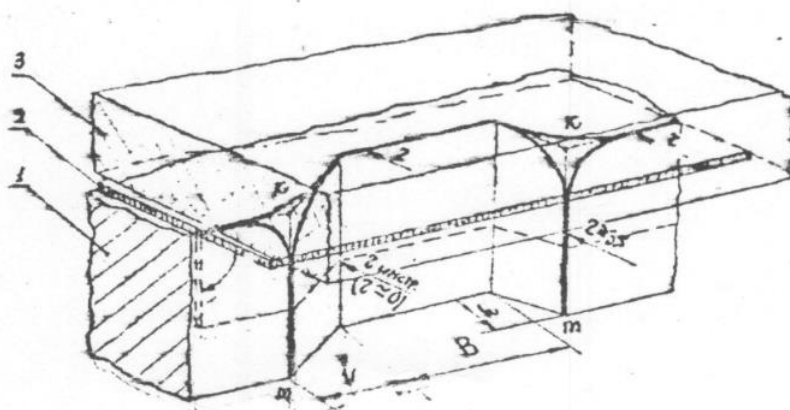
$$R = \frac{3h+r}{\sqrt{\frac{1}{2}\left(1+\frac{l}{\sqrt{h^2+l^2}}\right)}} - 3h; \quad (1.1)$$

$$bd = \frac{(3h+r)h}{\sqrt{h^2+l^2}+l}. \quad (1.2)$$

Однако при использовании данной технологии можно столкнуться со следующими проблемами:

- необходимость второго калибровочного перехода для формообразования конечной геометрии подсечки;
- необходимость использования нескольких наборов прижимных опор;
- недостаточность давления оборудования для обеспечения качественного формообразования подсечки с рекомендованными параметрами прижимной опоры.

В нормативном документе [50] описываются рекомендации по штамповке листовых подсечек эластичной средой. Одной из рекомендаций является использование эластичных накладок с определенной твердостью (см. Рисунок 1.5).



1 – формблок; 2 – заготовка; 3 – эластичная технологическая накладка.

Рисунок 1.5 – Схема использования эластичной технологической накладки

В отраслевом стандарте [50] приведена номограмма выбора параметров процесса штамповки эластичной средой из алюминиевых сплавов (см. Рисунок 1.6).

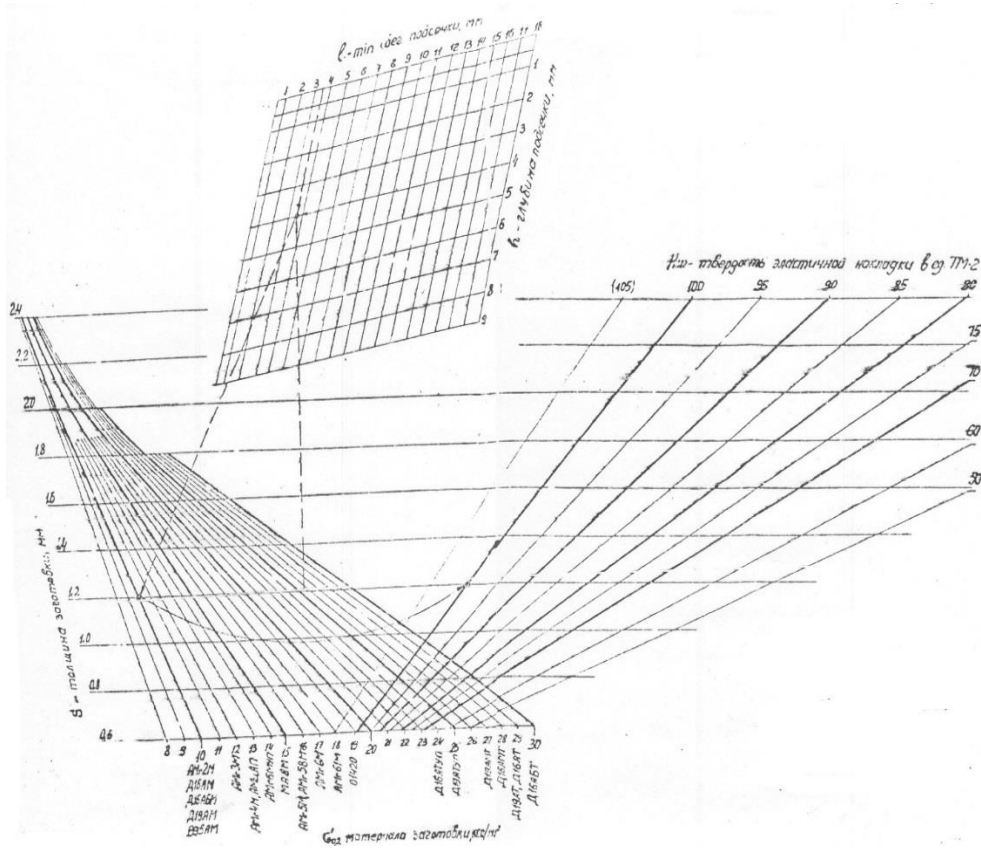


Рисунок 1.6 –Номограмма для расчета параметров процесса штамповки подсечек на деталях из алюминиевых сплавов

Номограмма построена на основе расчета по формуле (1.3):

$$7,5 \cdot h - 15 \cdot l + 406,25 \cdot S_0 + 11,25 \cdot \sigma_{0,2} + 0,76 \cdot H_{ш} - 5 \cdot S_0 \cdot \sigma_{0,2} - 3,12 \cdot S_0 \cdot H_{ш} - 218,2 = 0, \quad (1.3)$$

где h – высота (глубина) подсежки, мм;

l – сбеги подсежки, мм;

S – толщина заготовки мм;

$\sigma_{0,2}$ – предел текучести материала заготовки, кгс/мм²;

$H_{ш}$ – твердость эластичной технологической накладки по Шору А.

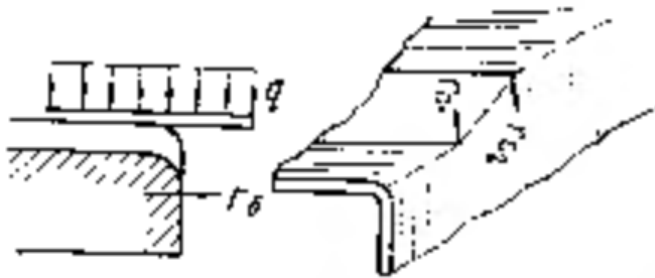
По номограмме можно определить значение любого из пяти переменных параметров (h , l , S , $\sigma_{0,2}$, $H_{ш}$), если известны четыре.

1.2. Обзор теоретических исследований формообразования подсечки

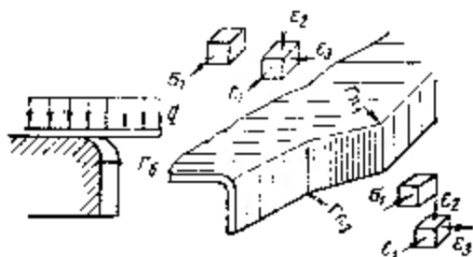
Теоретические исследования формообразования подсечек эластичной средой преследуют цель расчета деформации, минимальной толщины и потребного давления.

В работе [26] рассмотрены три варианта технологической задачи гибки - формовки подсечки под действием равномерно распределенной нагрузки эластичной среды:

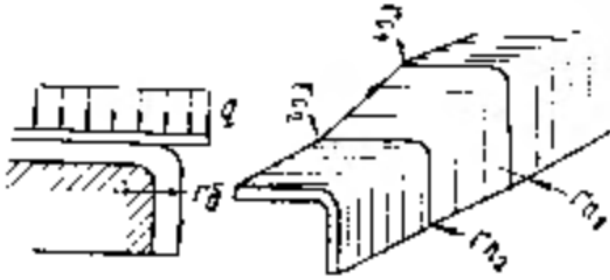
- гибка - формовка плоского борта, изломанного в плоскости стенки (см. Рисунок 1.7 а);
- гибка - формовка плоского борта, изломанного в своей плоскости (см. Рисунок 1.7 б);
- гибка - формовка плоского борта, изломанного в своей плоскости и в плоскости стенки (см. Рисунок 1.7 в).



а)



б)



в)

а) гибка - формовка плоского борта изломанного в плоскости стенки; б) гибка - формовка плоского борта, изломанного в своей плоскости; в) гибка - формовка плоского борта, изломанного в своей плоскости и в плоскости стенки.

Рисунок 1.7 - Варианты технологической задачи гибки

Боковые (срединные и концевые) подсечки являются наиболее распространенными и, вместе с тем, сложными конструктивными элементами деталей из листа, штампуемых эластичной средой. При формообразовании подсечки заготовка в области главного очага деформации находится в условиях сложного напряженного состояния (см. Рисунок 1.8).

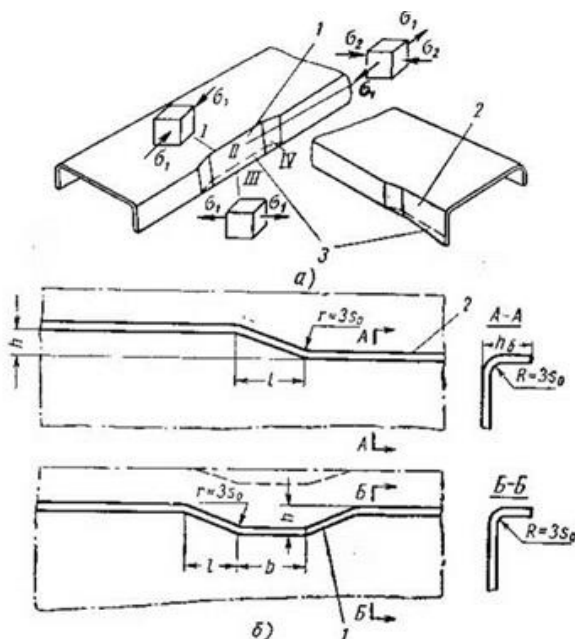


Рисунок 1.8 - Формы и геометрические параметры боковых подсечек, оформляемых эластичной средой

Так на закруглении формблока (ребро подсечки) имеет место схема, близкая к линейному одноосному сжатию ($\lambda = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \approx 0$); на плоской части подсечки — двухосная схема растяжения и сжатия ($1 > \lambda > 0$); на кромке борта и на углах сопряжения подсечки — схема, близкая к одноосному растяжению ($\lambda \approx 0$).

В зоне II из-за наличия плоской схемы с действующими напряжениями сжатия (при определенных соотношениях — $\frac{S_0}{K}$) проявляется потеря устойчивости в виде одной или серии серповидных складок.

Формообразование подсечки можно рассматривать как частный случай сложной гибки-формовки вогнутого борта. Конструктивно подсечка характеризуется, как описывалось ранее, глубиной h , длиной сбега l , радиусами сопряжения r , а также высотой борта h_b . Основным обобщенным критерием, определяющим геометрию подсечки, следует считать величину $\frac{h}{l} = \text{tg}\beta$ представляющую собой не что иное, как крутизну сбег подсечки K .

Чем больше крутизна подсечки, тем более сложными становятся условия ее формообразования при всех прочих одинаковых условиях.

Формообразование подсечки эластичной средой по формблоку складывается из гибки борта вокруг ребра формблока (r_b) и сопровождается растяжением (зона II и III) и сжатием ее отдельных элементов (зона I) в плоскости заготовки. Наиболее сложным участком с точки зрения условий формообразования подсечки является зона IV, соответствующая области сопряжения участка сбег подсечки и плоской ее части.

Под действием давления q_m участок AC (см.Рисунок 1.9) деформируется упруго-пластически и занимает положение ABC.

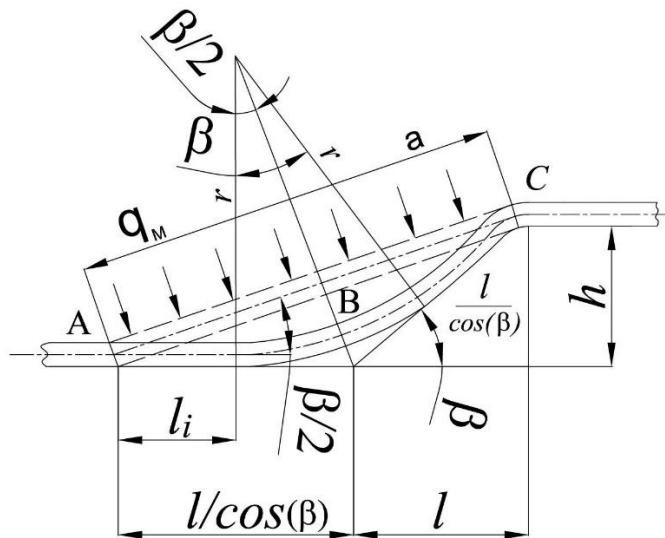


Рисунок 1.9 – Схема для анализа напряженно-деформированного состояния при гибке-формовке подсечки

Если допустить, что кривая ABC близка к окружности радиуса (см. формулу (1.4))

$$r = \left(\frac{l}{\cos\beta} - l_i \right) \frac{1}{\operatorname{tg}\frac{\beta}{2}} \quad (1.4)$$

и предположить, что напряжения σ_2 по ширине борта равны нулю, то уравнение Лапласа для рассматриваемого случая принимает вид (см. формулу (1.5)):

$$\frac{\sigma_1}{r} = \frac{q}{s_i} \quad (1.5)$$

В случае, когда силы трения между заготовкой и формблоком малы, осредненная деформация в долевом направлении борта подсечки будет равна (см. формулу (1.6)):

$$\varepsilon_{1cp} = \frac{2l_i + r\beta - a}{a} = \frac{2l_i + r\beta}{a} - 1 \quad (1.6)$$

При наличии контактных сил трения между заготовкой и форм-блоком характер распределения деформаций ε_1 будет неравномерный, изменяющийся в зависимости от r .

Деформация по ширине полки подсечки ε_2 практически мала и при анализе может быть принята равной нулю: $\varepsilon_2 \approx 0$.

Деформация в направлении изменения толщины стенки заготовки ε_3 может быть выражена (см. формулу (1.7):

$$\varepsilon_3 = \frac{s_i - s_0}{s_0} = \frac{s_i}{s_0} - 1 \quad (1.7)$$

Изменения толщины стенки в месте наибольшей деформации подсечки могут быть найдены из условия постоянства объема (см. формулы (1.8), (1.9), (1.10), (1.11))

$$(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_3) = 1; \quad (1.8)$$

$$\frac{2l_i + r\beta}{a} \cdot \frac{s_i}{s_0} = 1, \quad (1.9)$$

откуда

$$s_i = \frac{as_0}{2l_i + r\beta}, \quad (1.10)$$

или, при $r \rightarrow 0$, $l_i \rightarrow \frac{1}{\cos\beta}$,

$$s_{i(\min)} = \frac{as_0}{2 \frac{1}{\cos\beta}} = \frac{as_0 \sin\beta}{2lK} \quad (1.11)$$

Утонение стенки подсечки в месте наибольшей деформации (в зоне IV, Рисунок 1.8) будет тем значительнее, чем больше крутизна подсечки K , и тем меньше, чем больше величина a (см. Рисунок 1.9 и формулу (1.12):

$$\frac{s_i}{s_0} = \frac{a \sin\beta}{2lK} \quad (1.12)$$

Поскольку $\varepsilon_2 = 0$, уравнение совместности принимает вид (см. формулу (1.13) и (1.14)):

$$\frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \left(\sigma_2 - \frac{1}{2} \sigma_1 \right) = 0 \quad (1.13)$$

т.е.

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \sigma_1 \quad (1.14)$$

В этом случае интенсивность напряжений и деформаций выражается условием (см. формулу (1.15) и (1.16):

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\left(\sigma_1 - \frac{\sigma_1}{2}\right) + \frac{\sigma_1^2}{4} + \sigma_1^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{6\sigma_1^2}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_1, \quad (1.15)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 \quad (1.16)$$

Если принять аппроксимацию диаграммы истинных напряжений при простом растяжении $\sigma_i = f(l_i)$ в виде степенной функции $\sigma_i = A\varepsilon^\alpha$, то получим (см. формулы (1.17), (1.18))

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_1 = A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 \right)^\alpha, \quad (1.17)$$

откуда

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 \right)^\alpha = A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\alpha+1} \cdot \varepsilon_1^\alpha \quad (1.18)$$

С другой стороны, при сопоставлении формул (1.4), (1.5) и (1.6) имеем (см. формулу (1.19)):

$$\sigma_1 = \frac{q \left(\frac{l}{\cos\beta} - l_i \right) (2l_i + r\beta)}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} a s_0} \quad (1.19)$$

При сравнении формул (1.18) и (1.19) имеем (см. формулу (1.20))

$$A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\alpha+1} \cdot \varepsilon_1^\alpha = \frac{q \left(\frac{l}{\cos\beta} - l_i \right) (2l_i + r\beta)}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} a s_0} \quad (1.20)$$

Откуда (см. формулу (1.21))

$$q = \frac{A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\alpha+1} \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} a s_0 \varepsilon_1^\alpha}{\left(\frac{l}{\cos\beta} - l_i \right) (2l_i + r\beta)} \quad (1.21)$$

Если известна величина β , то можно узнать и l_i (см. формулу (1.22)):

$$l_i = \frac{l}{\cos\beta} - r \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}. \quad (1.22)$$

Подставляем формулу (1.22) в (1.21) имеем (см. формулу (1.23)):

$$q = \frac{A \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{\alpha+1} s_0 \left(\frac{2l}{\cos\beta} - 2r \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + r\beta - a \right)^\alpha}{r \left(\frac{2l}{\cos\beta} - 2r \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + r\beta \right)} \quad (1.23)$$

При линейной аппроксимации диаграммы истинных напряжений можно записать (см. формулу (1.24)):

$$\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0 + \frac{4}{3}\left(\frac{2l_i+r\beta}{a} - 1\right)\Pi = \frac{q\left(\frac{l}{\cos\beta}-l_i\right)(2l_i+r\beta)}{as_0tg\frac{\beta}{2}} \quad (1.24)$$

Откуда (см. формулу (1.25) и (1.26))

$$q = \frac{as_0\left[\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0 + \frac{4}{3}\Pi\left(\frac{2l_i+r\beta}{a} - 1\right)\right]tg\frac{\beta}{2}}{\left(\frac{l}{\cos\beta}-l_i\right)(2l_i+r\beta)} \quad (1.25)$$

или

$$q = \frac{as_0\left[\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_0 + \frac{4}{3}\frac{\Pi}{a}\left(\frac{2l}{\cos\beta} - 2rtg\frac{\beta}{2} + r\beta - a\right)\right]}{r\left(\frac{2l}{\cos\beta} - 2rtg\frac{\beta}{2} + r\beta - a\right)} \quad (1.26)$$

Принимая во внимания что (см. формулу (1.27))

$$tg\frac{\beta}{2} = \frac{1}{K}(\sqrt{1+K^2} - 1) \quad (1.27)$$

где $K = tg\beta = \frac{h}{l}$ – крутизна подсечки, окончательное выражение потребных давлений гибки-формовки подсечки принимает вид (см. формулу (1.28))

$$q = \frac{s_0\left[\frac{2}{\sqrt{3}}a\sigma_0 + \frac{4}{3}\Pi\left\{\frac{2l}{\cos\beta} - 2r\frac{1}{k}\left(\sqrt{1+K^2} - 1\right) + r\beta - a\right\}\right]}{r\left(\frac{2l}{\cos\beta} - 2r\frac{1}{k}\left(\sqrt{1+K^2} - 1\right) + r\beta\right)} \quad (1.28)$$

Как утверждает автор, эта формула не учитывает разглаживания складок, возникающих вследствие потери устойчивости свободного участка заготовки, входящей в зону подсечки.

Проведенные автором эксперименты показывают, что на условия формообразования срединных и концевых подсечек существенное влияние оказывает твердость эластичной среды, используемой в качестве деформирующего инструмента. Явления потери устойчивости проявляются в меньшей степени при использовании сред повышенной твердости.

Однако, при штамповке резиной затраты энергии на деформирование самой резины в отдельных случаях составляют 10 - 15% от общей энергии. Это приходится учитывать при сравнении опытных данных и найденных по формуле (15).

Гибка-формовка конструктивных элементов типа боковых подсечек является сложным процессом, в котором различные зоны заготовки испытывают различное напряженно-деформированное состояние. Применение повышенных (до 40 МПа) давлений со стороны деформирующего инструмента расширяет технологические возможности процесса при формообразовании подсечек.

Гибка и гибка-формовка эластичной, жидкостной или газовой средой охватывает три комплекса технологических задач, основными из которых являются:

- свободная гибка плоского борта, в деталях с плоской и криволинейной стенкой;
- свободная гибка-формовка криволинейного выпуклого и вогнутого борта в деталях с плоской и криволинейной стенкой;
- свободная гибка-формовка срединных и концевых подсечек в деталях с плоскими и криволинейными бортами и стенками.

К элементарным вопросам, из которых складывается решение основных технологических задач гибки и гибки-формовки эластичной средой, относятся:

- свободная гибка вокруг радиуса закругления гибочного ребра формблока плоского борта, консольно нагруженного равномерно-распределенной нагрузкой;
- деформирование круглой пластины по жестко защемленному внутреннему контуру и консольно нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой;
- деформирование круглой пластины, жестко защемленной по наружному контуру и консольно нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой;
- установление условий потери устойчивости равномерно-нагруженного фланца заготовки, защемленного по внутреннему контуру.

Аналитические и экспериментальные зависимости, полученные в результате исследований автора, могут быть использованы для установления технологических режимов малоскоростной свободной гибки-формовки резиной,

жидкостью и газами, а также взяты за основу при решении частных технологических задач.

Общие зависимости, описывающие условия потери устойчивости при свободной гибке-формовке, могут быть использованы при рассмотрении частных технологических задач при условии соблюдения граничных условий и принятия упрощающих допущений, определяемых характером формообразования деталей.

Также в работах [48, 47, 15] рассмотрена модель расчета минимальной толщины и напряжения при деформировании гидроэластичной средой и полиуретаном. Данные модели учитывают деформирование жестким инструментом и могут быть использованы при расчетах разработке моделей и формул. В работах [73, 94, 87, 84, 43, 44, 45, 76, 77] рассмотрены постановки задачи моделирования формообразования листовых заготовках методом конечных элементов. Данные результаты стоит использовать при проведении виртуальных экспериментов работе. Также в работах [99, 86, 18, 81, 70, 19, 20, 21, 22, 78, 36] рассмотрены примеры решения контактной задачи при конечно-элементном моделировании листовой штамповки. Опыт исследований этих работ можно использовать при решении задачи контакта листовой заготовки и оснастки для формообразования. Кроме того, в работах [37, 32, 31, 16, 80, 75, 56, 64, 95, 100] рассмотрены граничные условия (нагрузка и закрепления) для задач деформирования листовых заготовок, которые подойдут для верификации результатов предлагаемой модели и конечно-элементного моделирования.

1.3. Краткие выводы. Задачи исследования

1. Конструктивный элемент детали - подсечка широко используется в листовых деталях самолета, что объясняется одной из ее функций – стыковка с сопрягаемыми деталями;

2. Большинство теоретических и экспериментальных работ посвящены поиску рациональных параметров подсечек, при формообразовании которых не

возникает дефектов. Важное внимание уделяется использованию вспомогательных средств при формообразовании (технологические накладки и неподвижные опоры);

3. Одним из перспективных направлений является применение дополнительных элементов оснастки для создания более контролируемых и благоприятных условий деформирования. Так с помощью вспомогательных средств оснащения осуществляется смещение очагов деформации в проблемные зоны;

4. Применение дополнительных элементов оснастки и их движения в процессе деформирования сдерживается недостаточной изученностью процесса как в теоретическом, так и в практическом плане, отсутствием методов расчета технологических параметров, научно обоснованных рекомендаций по выбору геометрических параметров дополнительных элементов оснастки и ее проектирования.

С учетом изложенного поставлены основные задачи диссертационной работы:

1. Разработать новую технологию формообразования эластичной средой деталей с подсечками с подвижными элементами оснастки и новые методы устранения дефектов листовых деталей на листовых деталях с подсечками по средствам пластического формоизменения подвижными элементами оснастки;

2. Найти зависимости и создать математические модели процесса формообразования листовых деталей, имеющих подсечки, эластичной средой с подвижными элементами оснастки;

3. Определить параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации в процессе формообразования с подвижными элементами оснастки, позволяющие определять рациональные геометрические параметры подвижных элементов оснастки;

4. Провести верификацию результатов предложенной математической модели с конечно-элементным анализом;

5. Экспериментальное исследование процессов формообразования листовых деталей, имеющих подсежки с подвижными элементами оснастки с целью оценки эффективности проведения процессов с использованием подвижных элементов оснастки и верификации результатов натурального эксперимента и предложенных моделей

6. Получение на базе теоретического и экспериментального исследования научного обоснования по выбору и определению технологических режимов формообразования и определению рациональных параметров подвижных элементов оснастки;

2. Разработка математической модели расчета основных технологических параметров процесса формообразования

Из анализа основных технологических задач штамповки эластичной, жидкостной или газовой средами следует, что при формообразовании этими методами могут быть самые разнообразные схемы напряженно-деформированного состояния: от простейших (линейное сжатие или растяжение) до самых сложных (в том числе деформирование с дополнительным наложением больших напряжений гидростатического сжатия).

В ряде случаев при осуществлении одного и того же процесса наблюдается проявление самого разнообразного по сложности напряженного состояния в различных участках деформируемой заготовки. Однако в настоящее время большинство рассматриваемых процессов отличается следующими особенностями:

1. Проявление доминирующего действия главных напряжений в плоскости деформируемой заготовки. Для всех технологических задач штамповки тонкостенных деталей, осуществляемых при величине внешних давлений, не достигающих предела текучести, третьим компонентом главного напряжения можно, с допустимой для практики погрешностью, пренебречь. Следовательно, подавляющее большинство технологических задач штамповки эластичной, жидкостной или газовой средами можно рассматривать как плоские задачи.

2. Относительные толщины стенок деталей, штампуемых рассматриваемыми методами, достаточно малы, поэтому при решении технологических задач вполне допустимо применение основных положений без моментной теории оболочек [25].

3. Листовые материалы для изготовления деталей методами холодной штамповки (в том числе эластичной, жидкостной и газовой средами) вследствие больших пластических деформаций, сообщаемых им при получении листовых полуфабрикатов, имеют мелкозернистую структуру, однородны, а, следовательно,

в большинстве случаев могут рассматриваться как изотропные материалы, с применением к ним закономерностей, распространяемых на сплошные среды [25].

Используя при анализе процессов штамповки эластичной, жидкостной и газовой средами основные уравнения механики сплошной среды, нельзя не учитывать анизотропии свойств реальных листовых полуфабрикатов основных металлов и сплавов, применяемых в машиностроении. Как показали исследования [42], наиболее значительной анизотропией свойств обладают алюминиевые сплавы вследствие большой ориентации кристаллов при прокатке. Так, для некоторых алюминиевых сплавов предел прочности в направлении прокатки выше предела прочности в поперечном направлении на 32—44%.

В последние годы проводится значительное количество работ по уточнению возможности применения этой теории в условиях сложного напряженного состояния при достаточно больших деформациях [17].

Вместе с тем недостаточно проводилось исследований, показывающих возможность распространения основных закономерностей, вытекающих из теории малых упругопластических деформаций, на условия, близкие к процессам штамповки эластичной, жидкостной или газовой средами, если не принимать во внимание опыты по гидравлическому выпучиванию мембран, осуществленные Г. А. Смирновым-Аляевым [62], а позднее американскими исследователями А. Гляйцелем, Д. С. Вашингтоном [12], Н. А. Вэйлом и Н. М. Нимарком [7], а также последние работы, проводимые под руководством проф. А. Д. Томленова [65].

2.1. Основные теоретические положения

Для разработки достаточно надежных инженерных методов расчета технологических процессов штамповки деталей из листа эластичной средой, жидкостью или газами необходимо знать связь между напряжениями и деформациями в условиях плоского (двухосного) напряженного состояния при больших пластических деформациях.

Теория упругости дает в практически допустимых пределах изменения анизотропии удобное начертание связи между напряжениями и деформациями. В частности, в условиях сложного напряженного состояния эта связь может быть выражена (см.Формула (2.1):

$$\sigma_i = E \cdot e_i \quad (2.1)$$

где σ_i и e_i – соответственно обобщённые напряжения и деформации, выражаемые по формулам (см. Формулы (2.2),(2.3):

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.2)$$

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot (1-f)} \cdot \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2} \quad (2.3)$$

или в компонентах напряжений и деформаций имеем (см.Формулы (2.4), (2.5), (2.6):

$$e_1 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_1 - f(\sigma_2 + \sigma_3)) \quad (2.4)$$

$$e_3 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_2 - f(\sigma_3 + \sigma_1)) \quad (2.5)$$

$$e_2 = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_3 - f(\sigma_1 + \sigma_2)) \quad (2.6)$$

При этом для двухосного напряженного состояния ($\sigma_3 = 0$) выражение обобщённого напряжения примет вид (см.Формула (2.7):

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \quad (2.7)$$

В общем случае деформированное состояние при активной пластической деформации описывается известными физическими уравнениями (см.Формулы (2.8), (2.9), (2.10), (2.11), (2.12), (2.13):

$$\sigma_1 - \sigma_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot \sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot (e_1 - e_{\text{ср}}) \quad (2.8)$$

$$\sigma_2 - \sigma_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot \sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot (e_2 - e_{\text{ср}}) \quad (2.9)$$

$$\sigma_3 - \sigma_{\text{ср}} = \frac{2 \cdot \sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot (e_3 - e_{\text{ср}}) \quad (2.10)$$

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot \gamma_{12} \quad (2.11)$$

$$\tau_{23} = \frac{\sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot \gamma_{23} \quad (2.12)$$

$$\tau_{31} = \frac{\sigma_i}{3 \cdot e_i} \cdot \gamma_3 \quad (2.13)$$

где $\sigma_{\text{ср}} = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$.

Исходя из вышописанных формул следует что аналитически можно определить парметры минимальной толщины и потребного давления формообразования подсечки. Однако при ближайшем рассмотрении данные формулы работаю только в зоне номограммы [52] (см.Рисунок 2.1)

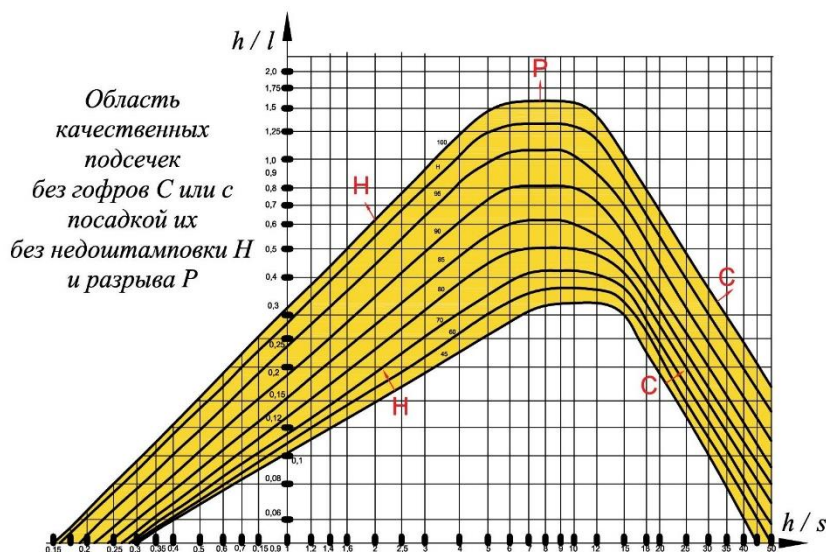
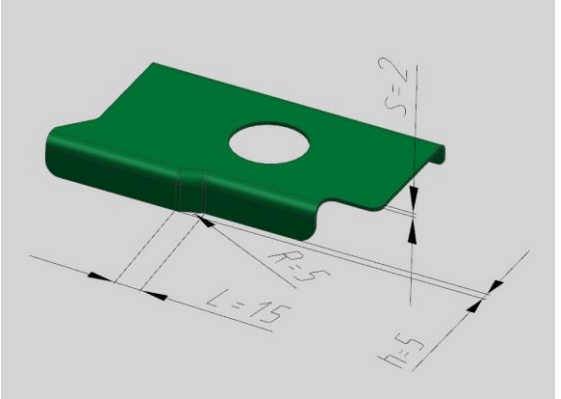
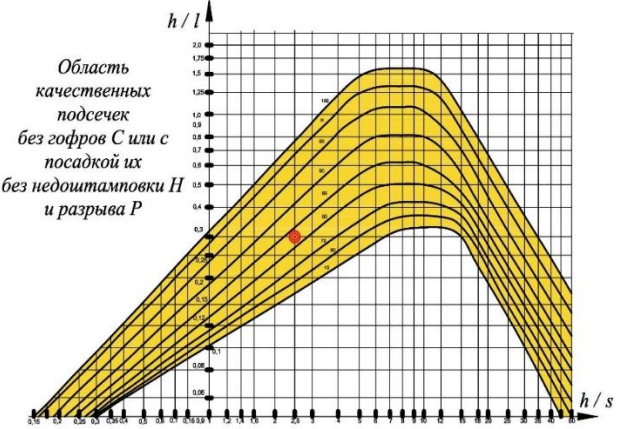
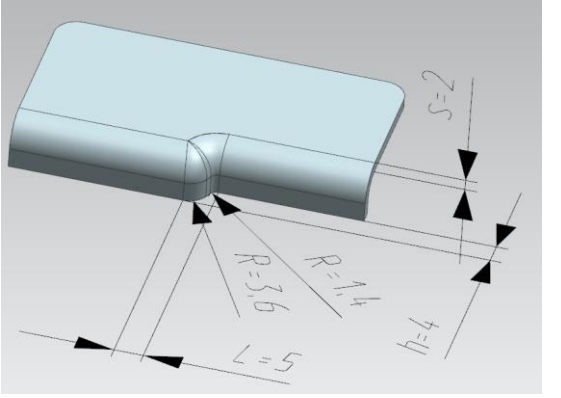
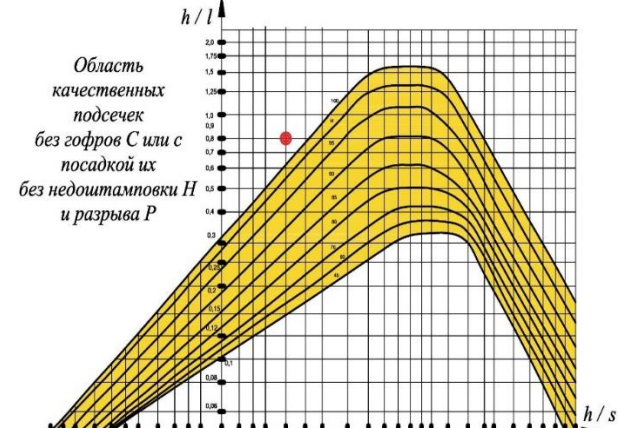
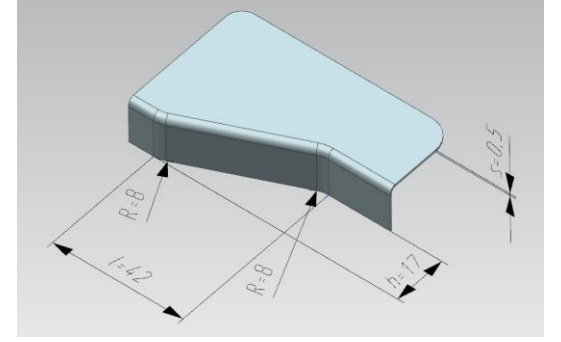
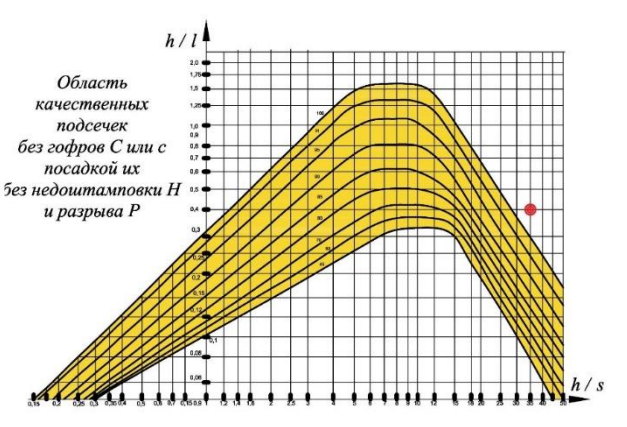


Рисунок 2.1 – Номограмма

Для потверждения этого рассмотрим три детали (см. Таблица 2.1):

1. Деталь входящую в номограмму;
2. Деталь в которой по номограмме должен быть дефект типа недоштамповка;
3. Деталь в которой по номограмме должен быть дефект типа гофра.

Таблица 2.1 – Детали для анализа

 <p>Материал Д16АМ</p>	 <p>Область качественных подсечек без гофров С или с посадкой их без недоштамповки Н и разрыва Р</p>
<p>Деталь №1</p>	
 <p>Материал Д16АМ</p>	 <p>Область качественных подсечек без гофров С или с посадкой их без недоштамповки Н и разрыва Р</p>
<p>Деталь №2</p>	
 <p>Материал Д16АМ</p>	 <p>Область качественных подсечек без гофров С или с посадкой их без недоштамповки Н и разрыва Р</p>
<p>Деталь №3</p>	

Проанализируем эти детали по отдельности.

2.2. Анализ детали №1

Исходя из формулы (2.14):

$$S_{i(min)} = \frac{as_0 \sin \beta}{2lK} \quad (2.14)$$

можно найти минимальную толщину для детали №1, исходя из того, что:

- $l = 15$ мм. – величина сбегса подсечки;
- $s_0 = 2$ мм. – толщина материала заготовки;
- $h = 5$ мм. – высота (глубина) подсечки;
- $h / l = 5 \text{ мм.} / 15 \text{ мм.} = K = 0,333$ – крутизна подсечки;
- $a = 9,26$ мм. – величина плоского наклонного участка на подсечки

(см.Рисунок 2.2);

– $\beta = 111,364^\circ$ - угол плоского наклонного участка на подсечки (см.Рисунок 2.2);

– $r = 44,1$ мм. – примерный радиус подсечки при формообразовании (см. Рисунок 2.2).

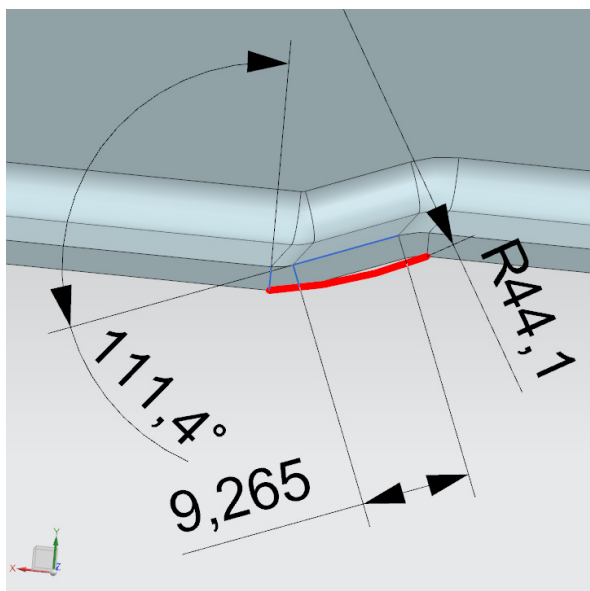


Рисунок 2.2 – Параметры подсеки для детали №1

Тогда по формуле (2.15):

$$S_{min} = \frac{9,26 \text{ мм.} \cdot 2 \text{ мм.} \cdot \sin(111,364)}{2 \cdot 10 \text{ мм.} \cdot 0,333} = 1,729 \quad (2.15)$$

Исходя из формулы (2.16):

$$q = \frac{s_0 \left[\frac{2}{\sqrt{3}} a \sigma_0 + \frac{4}{3} \Pi \left\{ \frac{2l}{\cos \beta} - 2r \frac{1}{k} \left(\left(\sqrt{1+K^2} - 1 \right) \right) + r\beta - a \right\} \right]}{r \left(\frac{2l}{\cos \beta} - 2r \frac{1}{k} \left(\left(\sqrt{1+K^2} - 1 \right) \right) + r\beta \right)} \quad (2.16)$$

можно найти требуемое давление формообразования для детали №1, исходя из того, что:

- $\Pi = 80 \text{ кГ/мм}^2$ модуль упругости [26];
- $\sigma_0 = 15 \text{ кГ/мм}^2$ – предел текучести [26];

Подставляя эти значения в формулу (2.16) получим (см. Формула (2.17)):

$$q = \frac{2 \text{ мм} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 9,26 \text{ мм} \cdot 15 \text{ кГ/мм}^2 + \frac{4}{3} \cdot 80 \text{ кГ/мм}^2 \left\{ \frac{2 \cdot 15 \text{ мм}}{\cos(111,364^\circ)} - 2 \cdot 44 \text{ мм} \cdot \frac{1}{0,333} \left(\left(\sqrt{1+(0,3333)^2} - 1 \right) \right) + 44 \text{ мм} \cdot 1,937 - 9,26 \text{ мм} \right\} \right]}{44 \text{ мм} \cdot \left(\frac{2 \cdot 15 \text{ мм}}{\cos(111,364^\circ)} - 2 \cdot 5 \text{ мм} \cdot \frac{1}{0,3333} \left(\left(\sqrt{1+(0,3333)^2} - 1 \right) \right) + 44 \text{ мм} \cdot 1,937 \right)} =$$

$$\frac{2 \text{ мм} \cdot [160,388 \text{ кГ/мм}^3 + 93,3 \text{ кГ/мм}^2 \{83,713 \text{ мм} - 56,448 \text{ мм}\}]}{44 \text{ мм} \cdot (-417,96 \text{ мм})} = 4,325 \text{ кГ/мм}^2 = 43,25 \text{ МПа} \quad (2.17)$$

По расчетам видно, что получаются корректные данные. При подсчете утонения по формуле (2.18) получаются значения менее 20 % [54]:

$$\Delta = \frac{s_0 - s_{min}}{s_0} \cdot 100\% = \frac{2 - 1,729}{2} \cdot 100\% = 13,55\% \quad (2.18)$$

Требуемое давление $q = 43,25 \text{ МПа} = 432 \text{ бар}$ не превышает значения формообразующих усилий прессов (см. Рисунок 2.3) на сегодняшний день [68].

QFC Press designation*	Tray width		Pressure (bar)	Tray length		Tray depth		Press length		Total length		Diaphragm exchange		Total width		Total height		Foundation depth		Total weight		Max transport weight (tons)	Installed power (kW)	Cycle time** (s)	Press force (tons)
	W (m)	L (m)		L4 (m)	H (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	W1 (m)	H1 (m)	H2 (m)	foundation (tons)	tons	tons	tons	tons	tons	tons							
QFC 0.7 x 1.8-800	0.7	1.83	800	1.83	0.175	3.0	11	4	2.3	3.0	0	32	32	68	75	17,000									
QFC 0.7 x 1.8-1400	0.7	1.83	1,400	1.83	0.175	3.0	11	4	2.3	4.0	0	40	40	68	95	30,000									
QFC 1 x 2-800	1	2	800	2.0	0.22	3.7	13.4	4.5	2.2	3.6	0	52	47	75	92	25,000									
QFC 1.1 x 3-1000	1.1	3	1,000	2.77	0.265	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.6	115	70	150	80	47,000									
QFC 1.1 x 3-1400	1.1	3	1,400	2.77	0.265	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.6	130	85	150	96	66,000									
QFC 1.1 x 4-1000	1.1	4	1,000	3.77	0.265	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.6	140	80	150	102	61,000									
QFC 1.1 x 4-1400	1.1	4	1,400	3.77	0.265	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.6	160	100	150	112	85,000									
QFC 1.2 x 3-1000	1.2	3	1,000	2.76	0.28	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.6	130	75	150	95	51,000									
QFC 1.2 x 3-1400	1.2	3	1,400	2.76	0.28	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.6	145	90	150	105	71,000									
QFC 1.2 x 4-1000	1.2	4	1,000	3.76	0.28	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.6	155	85	150	110	66,000									
QFC 1.2 x 4-1400	1.2	4	1,400	3.76	0.28	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.6	180	110	150	120	92,000									
QFC 1.4 x 3-1000	1.4	3	1,000	2.72	0.315	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.7	160	85	150	101	58,000									
QFC 1.4 x 3-1400	1.4	3	1,400	2.72	0.315	5.2	17.1	5.5	2.9	4.1	0.7	190	115	150	115	82,000									
QFC 1.4 x 4-1000	1.4	4	1,000	3.72	0.315	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.7	195	105	150	122	75,000									
QFC 1.4 x 4-1400	1.4	4	1,400	3.72	0.315	6	20.1	6.5	2.9	4.1	0.7	235	145	150	140	105,000									
QFC 1.6 x 3-1000	1.6	3	1,000	2.64	0.36	5.2	17.1	5.5	3.0	4.1	0.7	210	115	150	112	66,000									
QFC 1.6 x 3-1400	1.6	3	1,400	2.64	0.36	5.2	17.1	5.5	3.0	4.1	0.7	225	140	150	126	92,000									
QFC 1.6 x 4-1000	1.6	4	1,000	3.64	0.36	6	20.1	6.5	3.0	4.1	0.7	240	135	150	140	85,000									
QFC 1.6 x 4-1400	1.6	4	1,400	3.64	0.36	6	20.1	6.5	3.0	4.1	0.7	270	170	150	155	119,000									
QFC 1.8 x 3.6-1000	1.8	3.6	1,000	3.6	0.4	6	22.6	6.8	5.5	4.8	1.3	350	200	250	132	93,000									

Рисунок 2.3 – Линейка прессов для формообразования эластичной средой

2.3. Анализ детали №2

Однако при использовании формул (2.15), (2.16) для детали №2 с данными:

- $l = 5$ мм. – величина сбега подсечки;
- $s_0 = 2$ мм. – толщина материала заготовки;
- $h = 4$ мм. – высота (глубина) подсечки;
- $h / l = 4$ мм. / 5 мм. = $K = 0,8$ – крутизна подсечки;
- $a = 1,1$ мм. – величина плоского наклонного участка на подсечки;
- $\beta = 156,9^\circ$ - угол плоского наклонного участка на подсечки;
- $r = 14,3$ мм. – примерный радиус подсечки при формообразовании
- $\Pi = 80$ кГ/мм² модуль упрочнения [26];
- $\sigma_0 = 15$ кГ/мм² – предел текучести [26].

Для утонения получим (см.Формула (2.19):

$$S_{i(\min)} = \frac{1,1 \cdot 2 \text{ мм} \cdot \sin(156,9^\circ)}{2 \cdot 5 \text{ мм} \cdot 0,8 \text{ мм}} = 0,111 \quad (2.19)$$

Для потребного давления получим (см.Формула (2.20):

$$q = \frac{2 \text{ мм} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 1,1 \text{ мм} \cdot 15 \text{ кГ/мм}^2 + \frac{4}{3} \cdot 80 \text{ кГ/мм}^2 \cdot \left\{ \frac{2 \cdot 5 \text{ мм}}{\cos(156,9^\circ)} - 2 \cdot 14,3 \text{ мм} \cdot \frac{1}{0,8} \left((\sqrt{1+(0,8)^2} - 1) \right) + 14,3 \text{ мм} \cdot 2,738 - 1,1 \text{ мм} \right\} \right]}{14,3 \text{ мм} \cdot \left(\frac{2 \cdot 5 \text{ мм}}{\cos(156,9^\circ)} - 2 \cdot 14,3 \text{ мм} \cdot \frac{1}{0,8} \left((\sqrt{1+(0,8)^2} - 1) \right) + 14,3 \text{ мм} \cdot 2,738 \right)} =$$

$$\frac{2 \text{ мм} \cdot [12,702 \text{ кГ/мм}^3 + 106,667 \text{ кГ/мм}^2 \cdot \{-10,872 \text{ мм} - 1535,559 \text{ мм}\}]}{14,3 \text{ мм} \cdot (-1585,7565739)} = 14,547 = 145,47 \text{ МПа} \quad (2.20)$$

Утонение в % составляет (см.Формула (2.21):

$$\Delta = \frac{s_0 - S_{\min}}{s_0} \cdot 100\% = \frac{2 - 0,111}{2} \cdot 100\% = 94,45\% \quad (2.21)$$

Утонение намного превышает 20 % [54] и величина потребного давления превышает возможности прессов (см.Рисунок 2.3) (следовательно, деталь невозможно формообразовать эластичной средой)

Для детали выходящей за пределы номограммы слева предлагается расчет на основе деформации рассчитанной по площади формообразования. Допустим, что площадь поверхности, построенной на основе четырех вершин и кривой принадлежащей вершине подсечки является площадью для получения подсечки до формообразования (см.Рисунок 2.4).

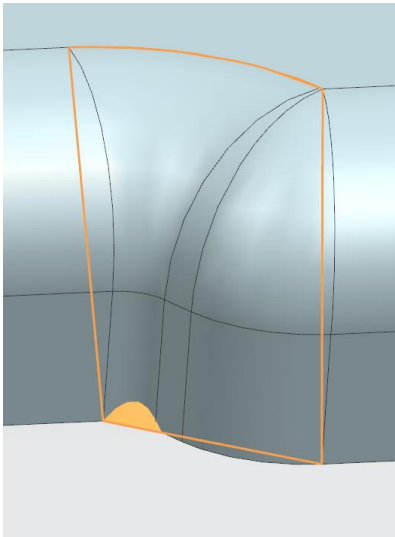


Рисунок 2.4 – Поверхность для расчета деформации

Тогда соотношения площади подсечки и площади построенной поверхности (см.Рисунок 2.5) является деформацией, характеризующей утонение. По формуле Брахмагупты (см.Формула (2.22) через определитель можно определить площадь поверхности этой поверхности [85, 93].

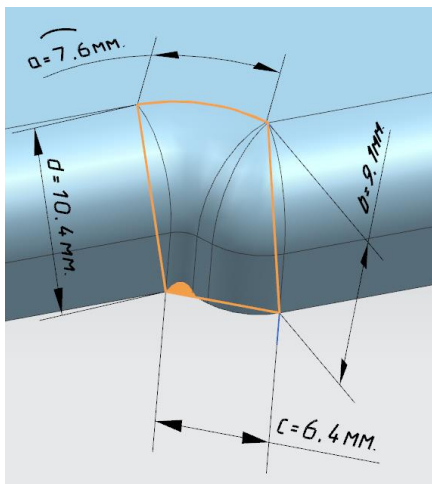


Рисунок 2.5 –Размеры поверхности

$$S = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{- \begin{vmatrix} a & b & c & -d \\ b & a & -d & c \\ c & -d & a & b \\ -d & c & b & a \end{vmatrix}} \quad (2.22)$$

Чтобы преобразовать эту формулу относительно матрицы в формуле Брахмагупты воспользуемся правилом Саррюса для нахождения определителя и получим (см.Формула (2.23):

$$S = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{- \begin{vmatrix} a & b & c & -d \\ b & a & -d & c \\ c & -d & a & b \\ -d & c & b & a \end{vmatrix}}$$

$$= \frac{1}{4} \cdot \sqrt{- \left(a^4 - 2 \cdot a^2 \cdot b^2 - 2 \cdot a^2 \cdot c^2 - 2 \cdot a^2 \cdot d^2 - 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d + b^4 - 2 \cdot b^2 \cdot c^2 - 2 \cdot b^2 \cdot d^2 + c^4 - 2 \cdot c^2 \cdot d^2 + d^4 \right)}$$

$$= 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4} \quad (2.23)$$

Подставляя длины кривых поверхности, построенной на основе четырех вершин и кривой принадлежащей вершине подсечки, получим (см.Формула (2.24):

$$S = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot (7,6\text{мм.})^2 \cdot (9,1\text{мм.})^2 - (7,6\text{мм.})^4 + 2 \cdot (7,6\text{мм.})^2 \cdot (6,4\text{мм.})^2 + 2 \cdot (7,6\text{мм.})^2 \cdot (10,4\text{мм.})^2 + 8 \cdot 7,6\text{мм.} \cdot 9,1\text{мм.} \cdot 6,4\text{мм.} \cdot 10,4\text{мм.} - (10,4\text{мм.})^4 + 2 \cdot (9,1\text{мм.})^2 \cdot (6,4\text{мм.})^2 + 2 \cdot (9,1\text{мм.})^2 \cdot (10,4\text{мм.})^2 - (6,4\text{мм.})^4 + 2 \cdot (6,4\text{мм.})^2 \cdot (10,4\text{мм.})^2 - (10,4\text{мм.})^4}$$

$$= 0,25 \cdot 293,112\text{мм.}^2 = 73,278\text{мм.}^2 \quad (2.24)$$

Тогда площадь поверхности подсечки аналогично вычисляется по формуле Брахмагупты (см.Рисунок 2.6, Формула (2.25)).

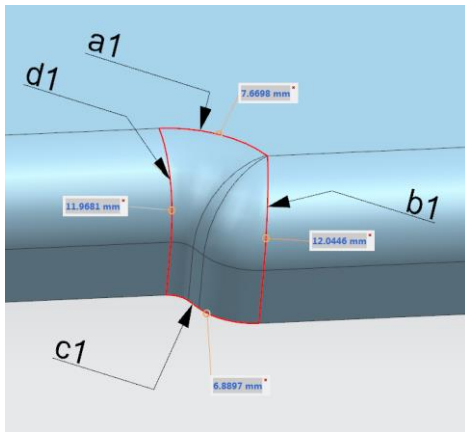


Рисунок 2.6 – Площадь поверхности подсечки

$$S1 = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot a1^2 \cdot b1^2 - a1^4 + 2 \cdot a1^2 \cdot c1^2 + 2 \cdot a1^2 \cdot d1^2 + 8 \cdot a1 \cdot b1 \cdot c1 \cdot d1 - b1^4 + 2 \cdot b1^2 \cdot c1^2 + 2 \cdot b1^2 \cdot d1^2 - c1^4 + 2 \cdot c1^2 \cdot d1^2 - d1^4} = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot (7,67\text{мм.})^2 \cdot (12,04\text{мм.})^2 - (7,67\text{мм.})^4 + 2 \cdot (7,67\text{мм.})^2 \cdot (6,89\text{мм.})^2 + 2 \cdot (7,67\text{мм.})^2 \cdot (11,97\text{мм.})^2 + 8 \cdot (7,67\text{мм.}) \cdot (12,04\text{мм.}) \cdot (6,89\text{мм.}) \cdot (11,97\text{мм.}) - (12,04\text{мм.})^4 + 2 \cdot (12,04\text{мм.})^2 \cdot (6,89\text{мм.})^2 + 2 \cdot (12,04\text{мм.})^2 \cdot (11,97\text{мм.})^2 - (6,89\text{мм.})^4 + 2 \cdot (6,89\text{мм.})^2 \cdot (11,97\text{мм.})^2 - (11,97\text{мм.})^4}$$

$$0,25 \cdot 349,424\text{мм.}^2 = 87,356\text{мм.}^2 \quad (2.25)$$

Минимальная толщина после формообразования, вследствие допущения, равна (см.Формула (2.26):

$$S_{i(min)} = S_0 - \frac{\varepsilon \cdot S_0}{100\%} \quad (2.26)$$

Где ε деформация по толщине вычисляемая по формуле (2.27).

$$\varepsilon = \frac{S_1 - S}{S_1} \cdot 100\% \quad (2.27)$$

Подставляя соответствующие значения площадей в формулу (2.27) получим (см.Формула (2.28):

$$\varepsilon = \frac{87,356\text{мм.}^2 - 73,278\text{мм.}^2}{87,356\text{мм.}^2} \cdot 100\% = 16,11\% \quad (2.28)$$

И тогда минимальная толщина равна (см.Формула (2.29) :

$$S_{i(min)} = 2\text{мм.} - \frac{16,11\% \cdot 2\text{мм.}}{100\%} = 1,678\text{мм.} \quad (2.29)$$

В общем виде формула для нахождения минимальной толщины выглядит следующим образом (см.Формула (2.30):

$$S_{i(min)} = \frac{S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}}}{\sqrt{8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}} \quad (2.30)$$

Для нахождения потребного давления определим полную деформацию, происходящую в подсечной зоне детали через соотношение площадей подсечной зоны детали и площади проекции данной детали (см.Рисунок 2.7).

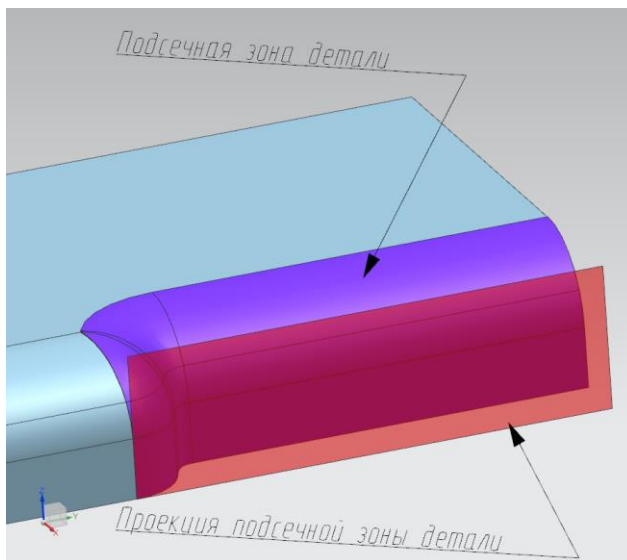


Рисунок 2.7 – Зоны для нахождения полной деформации

Найдем площадь поверхности подсечной зоны детали через формулу Брахмагупты (см.Рисунок 2.8, Формула (2.31)).

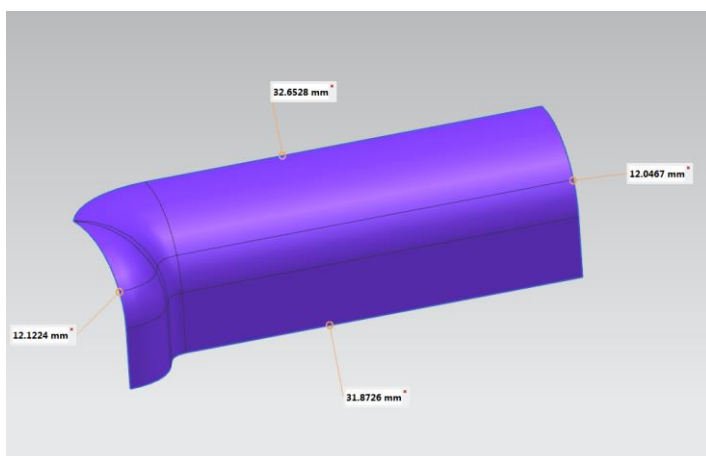


Рисунок 2.8 – Размеры площадь поверхности подсечной зоны

$$S3 = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4} = 0,25 \cdot \sqrt{2 \cdot (32,653\text{мм.})^2 \cdot (12,047\text{мм.})^2 - (32,653\text{мм.})^4 + 2 \cdot (32,653\text{мм.})^2 \cdot (31,873)^2 + 2 \cdot (32,653\text{мм.})^2 \cdot (12,122\text{мм.})^2 + 8 \cdot (32,653\text{мм.}) \cdot (12,047\text{мм.}) \cdot (31,873\text{мм.}) \cdot (12,122\text{мм.}) - (12,047\text{мм.})^4 + 2 \cdot (12,047\text{мм.})^2 \cdot (31,873\text{мм.})^2 + 2 \cdot (12,047\text{мм.})^2 \cdot (12,122\text{мм.})^2 - (31,873\text{мм.})^4 + 2 \cdot (31,873\text{мм.})^2 \cdot (12,122\text{мм.})^2 - (12,122\text{мм.})^4} = 0,25 \cdot 1583,689\text{мм.}^2 = 395,922\text{мм.}^2 \quad (2.31)$$

Площадь поверхности проекции находится как площадь прямоугольника (см.Рисунок 2.9, см.Формула (2.32)).

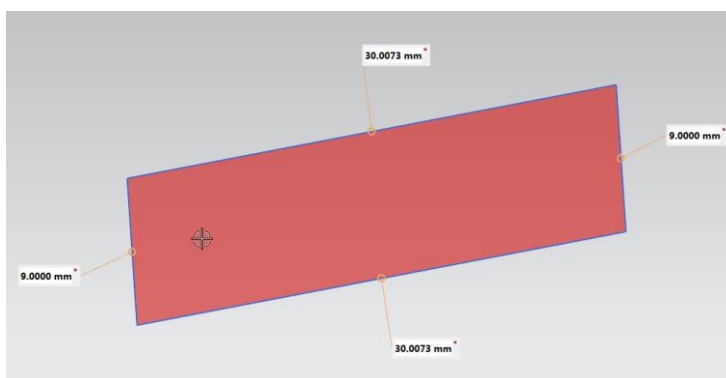


Рисунок 2.9 – Размеры проекции

$$S4 = a \cdot b = 9\text{мм.} \cdot 30,0073\text{мм.} = 270,0657\text{мм.}^2 \quad (2.32)$$

Исходя из этого полная деформация равна (см.Формула (2.33)):

$$\varepsilon_{\text{пол}} = \frac{S3 - S4}{S3} \cdot 100\% = \frac{395,922\text{мм.}^2 - 270,0657\text{мм.}^2}{395,922\text{мм.}^2} \cdot 100\% = 31,8\% \quad (2.33)$$

Для нахождения потребного давления необходимо рассчитать напряжения в пластической части кривой течения. Для описания поведения материала в пластической зоне воспользуемся функцией «Krupkowsky law» (см.Формула (2.34) [88]) Это математическая функция учитывающая деформационное упрочнения и связывающая эквивалентные напряжение с пластической деформацией.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (2.34)$$

где K- математическая постоянная данного материала;

n- коэффициент деформационного упрочнения;

ε_0 – деформация отсчета начала пластических деформаций;

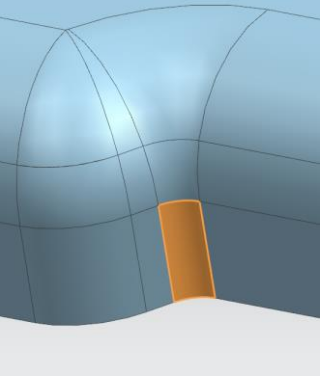
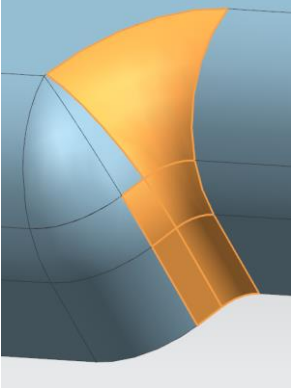
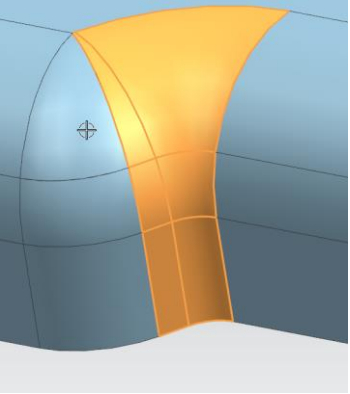
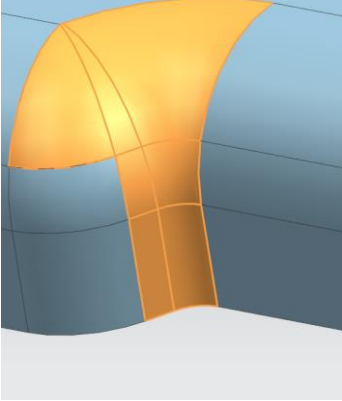
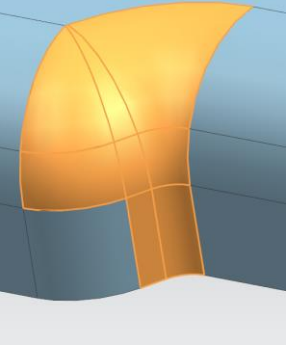
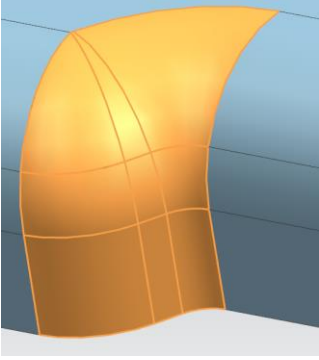
Для Д16АМ K= 324,17 МПа, n= 0,2183; $\varepsilon_0=0,0003$ и $\varepsilon_p= \varepsilon_{\text{пол}}/100\%$.

В нашем случае напряжения равны (см.Формула (2.35):

$$\sigma_{\text{под}} = 324,17 \text{ МПа}(0,0003 + 0,318)^{0,2183} = 252,627 \text{ МПа} \quad (2.35)$$

Рассчитывая потребное давление по классическим формулам было получено давление, превышающее значения формообразующих усилий прессов на сегодняшний день (см. Формула (2.20), $q=145,47$ МПа). Однако эта формула исходит из того что формообразование идет только эластичной средой и показывает, что без дополнительных элементов оснастки такая подсечка не может быть формообразоваться. Для формообразования данной подсечки нужно локализовать усилие формообразование на площади подсечки. Если предположить, что формообразование подсечки идет жесткий инструментом (повторяющий контур подсечки) приводимым в движение от давление эластичной среды то формообразование подсечки можно разбить на несколько этапов (см.Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Этапы формообразования

 <p>1 этап ($0.0678144 \cdot S1$)</p>	 <p>2 этап ($0.494001 \cdot S1$)</p>
 <p>3 этап ($0.53615 \cdot S1$)</p>	 <p>4 этап ($0.685311 \cdot S1$)</p>
 <p>5 этап ($0.790444 \cdot S1$)</p>	 <p>6 этап ($1 \cdot S1$)</p>

Исходя из формулы Брахмагупты можно найти площади формообразования для каждого этапа: $S_{1_под} = 5,924 \text{ мм.}^2$; $S_{2_под} = 43,154 \text{ мм.}^2$; $S_{3_под} = 46,836 \text{ мм.}^2$; $S_{4_под} = 59,866 \text{ мм.}^2$; $S_{5_под} = 69,05 \text{ мм.}^2$; $S_{6_под} = S1 = 87,356 \text{ мм.}^2$

Зная напряжения формообразования и суммарную площадь формообразования можно найти требуемое усилие [61, 66] формообразования данной подсечки (см.Формула (2.36):

$$F_{\text{пот}} = \sigma_{\text{под}} \cdot (S_{1\text{под}} + S_{2\text{под}} + S_{3\text{под}} + S_{4\text{под}} + S_{5\text{под}} + S_{6\text{под}}) =$$

$$252,627 \text{ МПа} \cdot (5,924 \text{ мм.}^2 + 43,154 \text{ мм.}^2 + 46,836 \text{ мм.}^2 + 59,866 \text{ мм.}^2 + 69,05 \text{ мм.}^2 +$$

$$87,356 \text{ мм.}^2) = 252,627 \text{ МПа} \cdot 312,186 \text{ мм.}^2 = 78866,663 \text{ Н} \quad (2.36)$$

Площадь воздействие давления для создания усилия можно найти [30](см.Формула (2.37):

$$p = \frac{dF}{dS} \quad (2.37)$$

Исходя из этого можно вывести формулу для среднего давления (см.Формула (2.38):

$$p_{\text{ср}} = q_{\text{пот}} = \frac{F_{\text{пот}}}{S_{\text{пот}}} \quad (2.38)$$

Исходя из этого можно построить график показывающий изменение площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления (см.Рисунок 2.10).

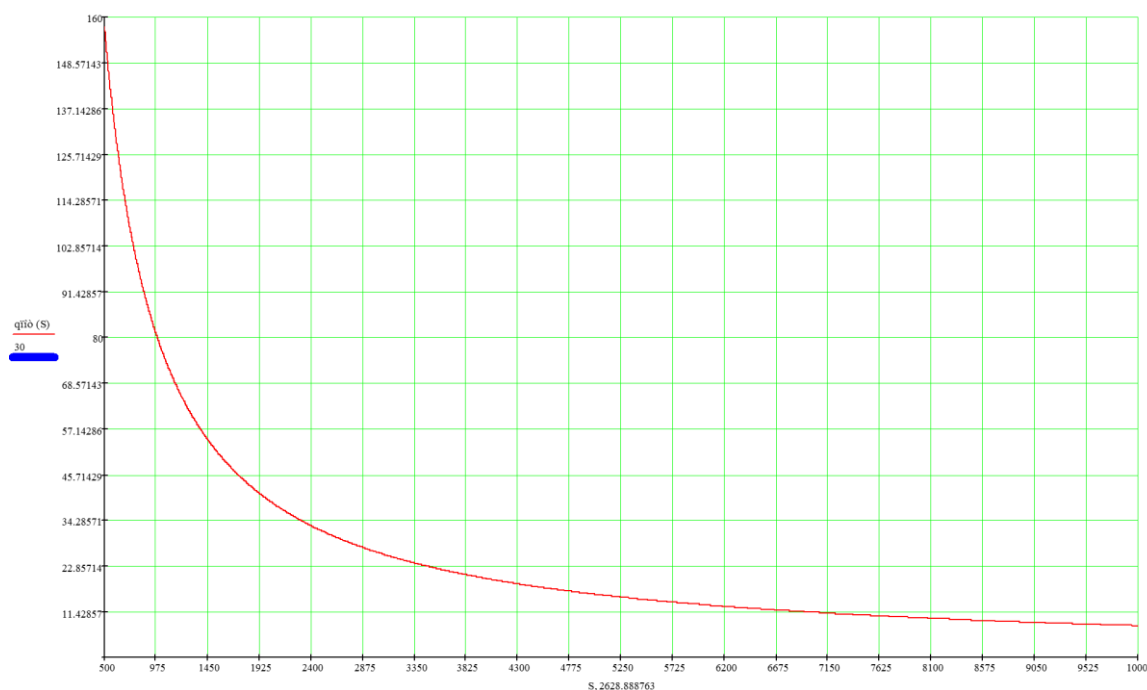


Рисунок 2.10 – График изменения площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления

По графику видно, что чем меньше площадь воздействия давления на жестком инструменте, тем больше давление. Предположим, что имеется пресс с максимальным давлением 30 МПа то по формуле (2.39):

$$S_{\text{пот}} = \frac{F_{\text{пот}}}{q_{\text{пот}}} = \frac{78866,663\text{Н}}{30\text{ МПа}} = 2628,888\text{мм}^2 \quad (2.39)$$

Для детали примерный профиль опорной кривой контактной поверхности был выбран в виде сплайновой кривой для более гибкого управления ей (см.Рисунок 2.11).

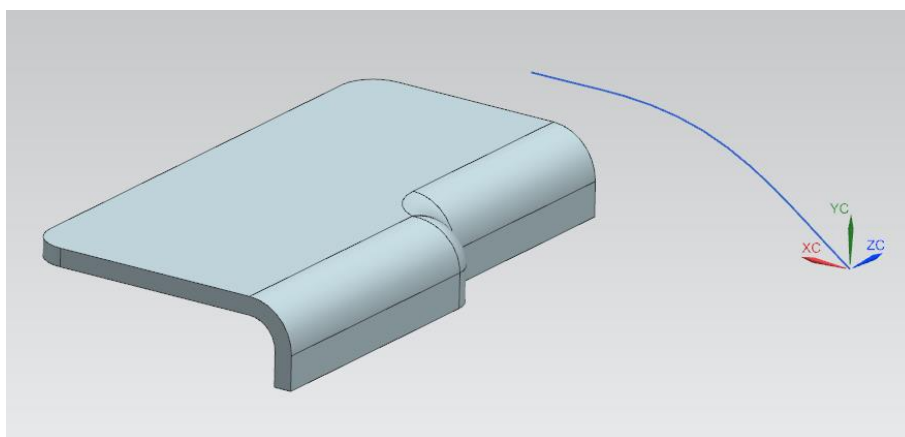


Рисунок 2.11 – Профиль опорной поверхности

Если данный профиль представить в виде графика, то получим график (см.Рисунок 2.12).

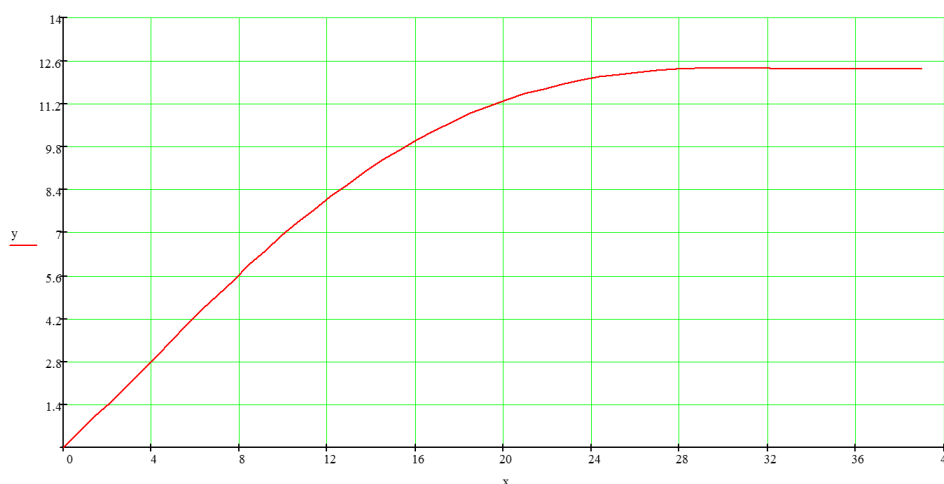


Рисунок 2.12 – Профиль в системе координат xOy

Для вывода функции данного профиля целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов [34]. Суть метода наименьших квадратов сводится к тому что результатами измерений некоторой величины A являются числа x_1, x_2, \dots, x_n . Предполагается что все измерения произведены с одинаковой тщательностью, т.е. равноточными и что случайные ошибки распределены по закону Гаусса [74, 8].

Рассмотрим гипотезы, состоящие в том, что измеряемая величина равна x , а мера точности произведенных измерений равна h . При сделанных допущениях о значениях x и h , а также, в силу теоремы умножения вероятностей (вероятность совмещения события A и B равно произведению вероятности одного из события на условную вероятность в предположении, что первое имело место), вероятность получения ряда измерений, т.е. вероятность получения ошибок, которые одновременно попадают в интервалы $[\varepsilon_i, \varepsilon_i + d\varepsilon]$ для $i=1,2,\dots,n$; равна (см.Формула (2.40):

$$\varphi(x - x_1), \varphi(x - x_2) \dots \varphi(x - x_n) d\varepsilon^n \quad (2.40)$$

Или, пользуясь выражением для плотности нормального распределения имеем (см.Формула (2.41):

$$\frac{h^n}{\pi^{n/2}} \cdot e^{-h^2 \cdot ((x-x_1)^2 + (x-x_2)^2 + \dots + (x-x_n)^2)} \cdot d\varepsilon^n \quad (2.41)$$

Так как до испытаний все значения x и h следует считать равновероятными, то вследствие теоремы Байеса [71] вероятность самой гипотезы пропорциональна, т. е. равна (см.Формула (2.42):

$$E = G \cdot h^n \cdot e^{-h^2 \cdot ((x-x_1)^2 + (x-x_2)^2 + \dots + (x-x_n)^2)} \quad (2.42)$$

где G - постоянный множитель пропорциональности, куда включены также не зависящие от h и от x множители $\frac{1}{\pi^{n/2}}$ и $d\varepsilon^n$.

Прежде всего отметим, что при любой гипотезе относительно h величина E будет наибольшей, если x выбран так, что сумма будет наименьшей (см.Формула (2.43):

$$(x - x_1)^2 + (x - x_2)^2 + \dots + (x - x_n)^2 = \sum_{i=1}^n (x - x_i)^2 \quad (2.43)$$

Таким образом, исходя из того, что ошибки распределены по закону Гаусса, мы пришли к следующему выводу. Наивероятнейшим значением, которое можно получить из ряда измерений одинаковой точности, является такое значение, для которого сумма квадратов разностей этого значения и результатов измерений является наименьшей. Это положение называется методом наименьших квадратов.

На самом деле, абсолютно точные измерения чаще всего невозможны. Для того, чтобы исключить влияние ошибок, производится большое число измерений. Каждое измерение дает нам уравнение, связывающее неизвестные коэффициенты. При большом числе измерений мы приходим, следовательно, к системе, число уравнений в которой значительно больше, нежели число неизвестных. Здесь ставится задача отыскания наиболее вероятных значений коэффициентов, которые, вообще говоря, не будут точно удовлетворять ни одному из уравнений системы. Эту задачу можно сформулировать в более общем виде.

Пусть дана функция $y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_m)$ с независимой переменной x и $m + 1$ параметра a_0, a_1, \dots, a_m . Эти параметры постоянны, но заранее неизвестны и подлежат определению. Для их отыскания производится ряд измерений величин x и y . Подставляя их в равенство $y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_m)$ мы получаем уравнения между параметрами a_0, a_1, \dots, a_m , вида (см. Формула (2.44):

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.44)$$

где x_i и y_i , — соответствующие друг другу измеренные значения, а n — число измерений.

Если бы значения x и y находились точно, то для отыскания $m + 1$ параметра достаточно было бы произвести $m + 1$ измерение. На самом деле, значения x и y содержат ошибки, и никакие $m + 1$ измерений не позволят определить истинные значения параметров. Поэтому обычно производится большее число измерений ($n > m + 1$), в результате чего число уравнений ($y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$) будет больше, чем число неизвестных параметров. В этом случае система будет несовместной, т. е. точные решения каких-либо $(m + 1)$ из уравнений системы могут не удовлетворять остальным уравнениям. Требуется найти наиболее

вероятные значения неизвестных параметров. Эти вероятные значения будут тем более близки к истинным, чем больше число наблюдений.

Так как уравнения $y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) удовлетворяются неточно, то будем иметь (см. Формула (2.45):

$$y_i - f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) = \varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.45)$$

где ε_i — отклонения измеренных значений y_i , от вычисленных по формуле $y = f(x; a_0, a_1, \dots, a_m)$.

Принцип наименьших квадратов утверждает, что наиболее вероятными значениями параметров будут такие, при которых сумма квадратов отклонений ε_i , будет наименьшей, т. е. имеем выражение (см. Формула (2.46):

$$S = \sum_{i=0}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=0}^n [y_i - f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)]^2 = \min \quad (2.46)$$

Функцию S называют функцией невязки.

Для интерполирования профиля опорной кривой целесообразно воспользоваться полином n -степени, имеющей вид (см. Формула (2.47):

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + \dots + a_m \cdot x^m \quad (2.47)$$

где a_0, a_1, \dots, a_m - неизвестные коэффициенты.

Нашей задачей является нахождение по результатам наблюдений наиболее вероятных значений коэффициентов a_0, a_1, \dots, a_m . Если бы число наблюдений в точности равнялось числу неизвестных коэффициентов, то мы имели бы дело с задачей интерполяции. Значительно более важным является тот случай, когда число наблюдений n много больше степени многочлена. В этом случае получается обычная задача способа наименьших квадратов. Требуется найти коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_m , дающие минимум функции невязки т.е имеем (см. Формула (2.48):

$$S = \sum_{i=0}^n [y_i - (a_0 + a_1 \cdot x + \dots + a_m \cdot x^m)]^2 \quad (2.48)$$

Условие минимума S определяется уравнениями (см. Формула (2.49):

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0 \quad (2.49)$$

Условие $S = \sum_{i=0}^n [y_i - (a_0 + a_1 \cdot x + \dots + a_m \cdot x^m)]^2$ с учетом $\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0$ эквивалентно системе уравнений (см. Формула (2.50):

График показывает совпадение точек профиля и построенной функции (см.Рисунок 2.13).

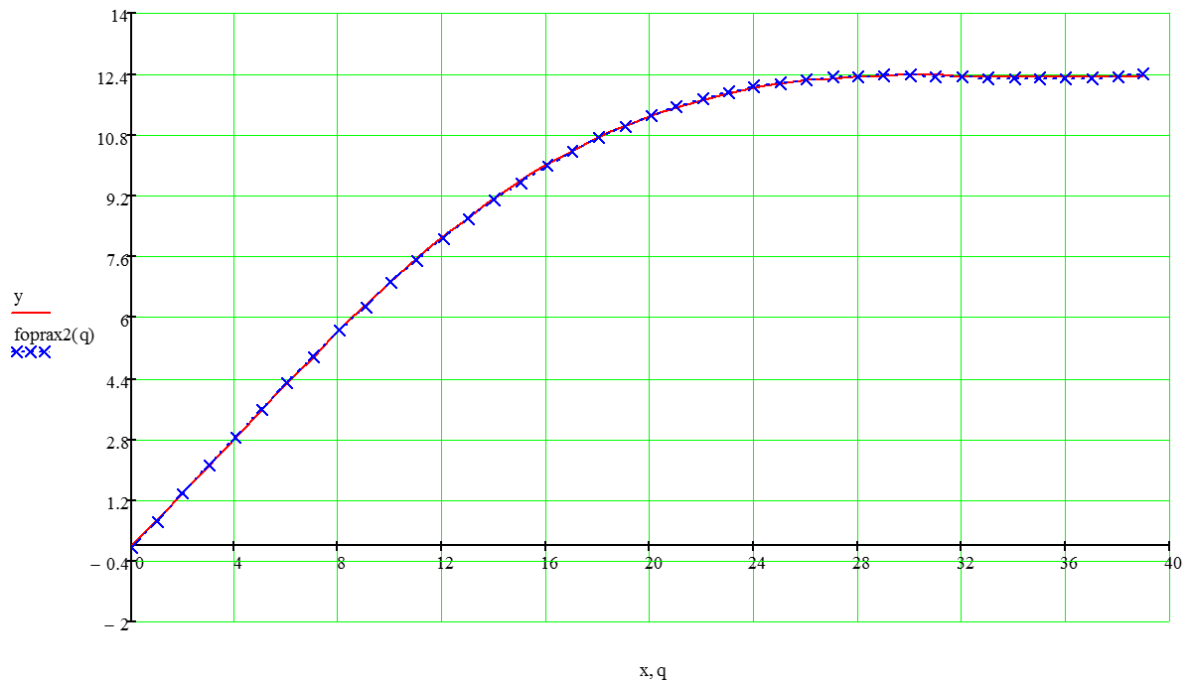


Рисунок 2.13 – Сравнение графиков

Теперь можно составить уравнение поверхности. Если оно не зависит от значения перпендикулярно плоскости профиля оно будет иметь вид (см.Формула (2.54), Рисунок 2.14):

$$z(x, y) = -0,060389 + 0,723742 \cdot x + 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + 0,000013 \cdot x^4 \quad (2.54)$$

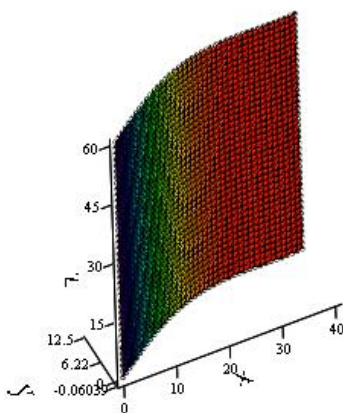


Рисунок 2.14 – Поверхность в системе координат XYZ

Однако, чтобы иметь возможность управлять выпуклостью поверхности необходимо добавить в уравнение поверхность переменную y с функцией косинусоиды и будем иметь (см.Формула (2.55), Рисунок 2.15):

$$z(x, y) = (-0,060389 + 0,723742 \cdot x + 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + 0,000013 \cdot x^4) + \left(-2 \cdot \cos\left(\frac{y}{10}\right)\right) \quad (2.55)$$

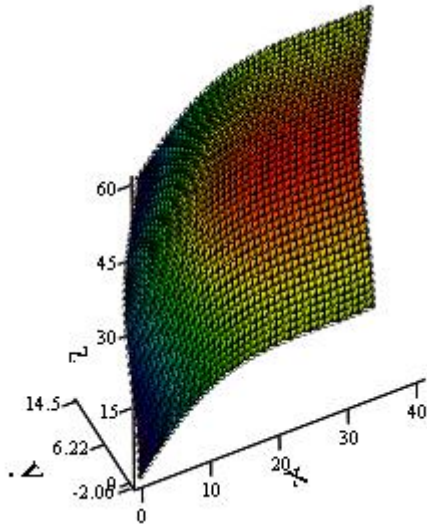


Рисунок 2.15 – Выпуклая поверхность в системе координат XYZ

Данный параметр $\left(-2 \cdot \cos\left(\frac{y}{10}\right)\right)$ можно использовать для вариации площади контакта подвижного элемента с эластичной средой. В общем виде уравнение поверхности будет иметь вид (см.Формула (2.56):

$$z(x, y) = (\epsilon + \epsilon_1 \cdot x + \epsilon_2 \cdot x^2 + \epsilon_3 \cdot x^3 + \epsilon_4 \cdot x^4) + \left(\omega_1 \cdot \cos\left(\frac{y}{\omega_2}\right)\right) \quad (2.56)$$

где $\epsilon, \epsilon_1, \epsilon_3, \epsilon_4$ – коэффициенты контролирующие профиль и позволяющие его модифицировать, ω_1 – коэффициент позволяющий менять прогиб в направление y поверхности и его направленность, ω_2 – коэффициент отвечающий за размер периода функции в направлении z .

Теперь необходимо вычислить аналитически площадь поверхности заданной видом функции $f(x, y)$. Для этого можно воспользоваться двойным интегралом [10, 24] формулой для вычисления площади поверхности по двойному интегралу [5, 41] (см.Формула (2.57):

$$S = \iint_D f(x, y) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2} dx dy \quad (2.57)$$

Областью интегрирования является проекция, образованная нашей поверхностью в пределах интегрирования или размерах поверхности. Используя формулу получаем для нашего профиля (см. Формула (2.56)) следующее выражение (см. Формула (2.58)):

$$S_{\text{интер}} = \int_0^{39} \int_0^{12,5} \left(\begin{array}{c} -0,060389 + 0,723742 \cdot x + \\ 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + \\ 0,000013 \cdot x^4 \end{array} \right) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} -0,060389 + 0,723742 \cdot x + \\ 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + \\ 0,000013 \cdot x^4 \end{array} \right) \right)^2 + \left(\frac{d}{dy} \left(\begin{array}{c} -0,060389 + 0,723742 \cdot x + \\ 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + \\ 0,000013 \cdot x^4 \end{array} \right) \right)^2} = \int_0^{39} \int_0^{12,5} \left(\begin{array}{c} -0,060389 + 0,723742 \cdot x + \\ 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + \\ 0,000013 \cdot x^4 \end{array} \right) \cdot \sqrt{\begin{array}{c} 2,803 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,916 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + \\ 0,0000087 \cdot x^4 + 0,0000182 \cdot x^3 - 0,00387 \cdot x^2 = 2522,898 \text{ мм.}^2 \\ + 0,0153 \cdot x + 0,524 \end{array}} \quad (2.58)$$

В общем виде формула для вычисления площади по двойному интегралу выглядит следующим образом (см. Формула (2.59)):

$$S_{\text{интер}} = \int_0^x \int_0^y \left(\begin{array}{c} (\epsilon + \epsilon_1 \cdot x + \epsilon_2 \cdot x^2) + \\ + \epsilon_3 \cdot x^3 + \epsilon_4 \cdot x^4 \\ (\omega_1 \cdot \cos\left(\frac{y}{\omega_2}\right)) \end{array} \right) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} (\epsilon + \epsilon_1 \cdot x + \epsilon_2 \cdot x^2) + \\ + \epsilon_3 \cdot x^3 + \epsilon_4 \cdot x^4 \\ (\omega_1 \cdot \cos\left(\frac{y}{\omega_2}\right)) \end{array} \right) \right)^2 + \left(\frac{d}{dy} \left(\begin{array}{c} (\epsilon + \epsilon_1 \cdot x + \epsilon_2 \cdot x^2) + \\ + \epsilon_3 \cdot x^3 + \epsilon_4 \cdot x^4 \\ (\omega_1 \cdot \cos\left(\frac{y}{\omega_2}\right)) \end{array} \right) \right)^2} dx dy \quad (2.59)$$

где x и y пределы интегрирования являющейся размерами проекции на плоскость xOy (см. Рисунок 2.16);

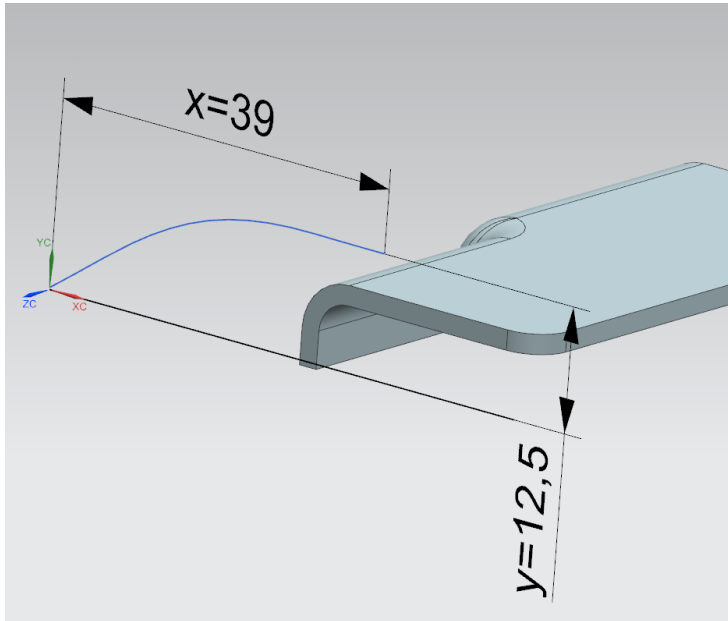


Рисунок 2.16 – Размеры проекций

Однако взятие двойного интеграла по поверхности достаточно трудоёмкий процесс расчета. Имеет смысл заменить вычисления с одинарным интегралом используя формулу Герона [97] в постановке для четырёхугольника, когда d не стремится к 0, тогда будем иметь (см.Формула (2.60)):

$$S = \sqrt{(p - A) \cdot (p - B) \cdot (p - C) \cdot (p - D)} \quad (2.60)$$

где $p = \frac{A+B+C+D}{2}$ т.е полупериметр;

A, B, C, D – стороны построенной поверхности (см.Рисунок 2.17);

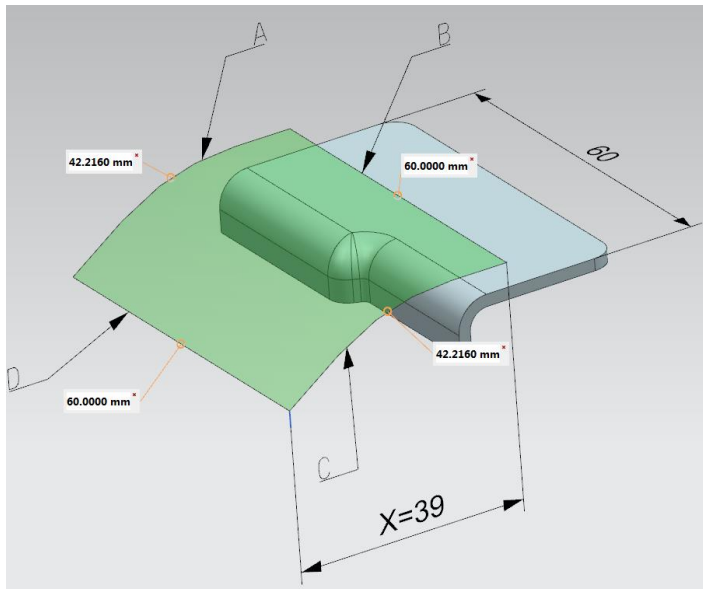


Рисунок 2.17 - Стороны построенной поверхности

Зная уравнение кривой А и С можно найти с помощью криволинейного интеграла 1 рода [55, 29, 3] длину данной кривой по формуле (2.61).

$$\begin{aligned}
 A = C &= \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}y(x)\right)^2} dx \\
 &= \int_0^{39} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{l} 0,723742 \cdot x + 0,005302 \cdot x^2 \\ -0,000918 \cdot x^3 \\ +0,000013 \cdot x^4 - 0,060389 \end{array} \right)\right)^2} dx \\
 &= \int_0^{39} \sqrt{1 + \left(\begin{array}{l} 0,0154 \cdot x - 0,00387 \cdot x^2 + 0,0000182 \cdot x^3 + \\ 0,00000871 \cdot x^4 - 2,92 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + \\ 2,8 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 + 0,524 \end{array} \right)^2} dx = \\
 &\int_0^{39} \sqrt{ \begin{array}{l} 2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + \\ 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3 \\ -0,00387 \cdot x^2 + 0,0153 \cdot x^2 + 1,524 \end{array} } dx \quad (2.61)
 \end{aligned}$$

Полупериметр в свою очередь равен (см.Формула (2.62)):

$$p = \frac{A+B+C+D}{2} = \frac{\int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx + B + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx + D - 0,00387 \cdot x^2 + 0,0153 \cdot x^2 + 1,524}{2} = 0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx - 0,00387 \cdot x^2 + 0,0153 \cdot x^2 + 1,524 \quad (2.62)$$

Площадь из этого равна (при $B = D = 60$ мм.т.е ширине детали.) (см.Формула (2.63):

$$S_{\text{rep}} = \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx - \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) \cdot \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) - B \right) \right) = \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) - \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) \cdot \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) - D \right) = \left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D \right)^2 \cdot \left(-0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) \cdot \left(0,5 \cdot B - 0,5 \cdot D + \int_0^{39} \sqrt{2,798 \cdot 10^{-9} \cdot x^6 - 2,909 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 0,00000868 \cdot x^4 + 0,0000183 \cdot x^3} dx \right) = 2527,57 \text{ мм.}^2 \quad (2.63)$$

$S_{\text{интег}} = 2522,898 \text{ мм.}^2$ и $S_{\text{гер}} = 2527,57 \text{ мм.}^2$ различаются менее чем на 0,5 % (а именно на 0,18%). Следовательно, результаты можно считать идентичными. В общем виде формула для расчета площади через формулу Герона, стороны А и С и полупериметр имеют вид (см.Формулы (2.64), (2.65), (2.66):

$$A = C = \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{matrix} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ + a_3 \cdot x^3 \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{matrix} \right) \right)^2} dx \quad (2.64)$$

$$p = \frac{A+B+C+D}{2} = 0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ + a_3 \cdot x^3 \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx \quad (2.65)$$

$$S_{\text{гер}} = \sqrt{\left((0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D)^2 + \left(-0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ + a_3 \cdot x^3 \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx \right)^2 \right) \cdot \left(0,5 \cdot B - 0,5 \cdot D + \int_0^X \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx} \left(\begin{array}{c} a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 \\ + a_3 \cdot x^3 \\ + a_4 \cdot x^4 - a_0 \end{array} \right) \right)^2} dx \right)^2} \quad (2.66)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 - коэффициенты интерполяции профиля кривой;

X – величина габарита графика в направлении X в плоскости xOy ;

Однако $S_{\text{пот}} = 2628,888\text{мм}^2$ превышает $S_{\text{гер}}$ что говорит о том что необходимо увеличить B и D до 63 мм. В результате площадь увеличится до $S_{\text{гер}} = 2653,948$ что отличается от $S_{\text{пот}}$ в большую сторону менее 1%.

Для обеспечения движения подвижного прижима необходимо чтобы выдерживался угол наклона кривой профиля в диапазоне от 30 до 50 градусов в противном случае возможно заклинивание прижима при движении. Для того чтобы найти угол наклона нужно взять производную от функции профиля [4] (см. Формула (2.67):

$$\dot{y}(x) = 0,0000529 \cdot x^3 - 0,00275 \cdot x^2 + 0,0106 \cdot x + 0,724 \quad (2.67)$$

Графическое представление производной показывает Рисунок 2.18 .



Рисунок 2.18 – График производной

Т.к нас интересует область начала профиля кривой (примерно 0 до 10 т.к это начало профиля в том же диапазоне (см.Рисунок 2.13) график примет вид который показывает Рисунок 2.19.



Рисунок 2.19 – Интересующий диапазон графика

По методикам поиска экстремума [58] находим значение максимума производной $y'(2,048) = 0,735$. Т.е участок при котором функция ведет себе с малыми отклонениями от линейной функции можно принять как $2 \cdot 2,048 = 4,097$. Тогда график примет вид, который показывает

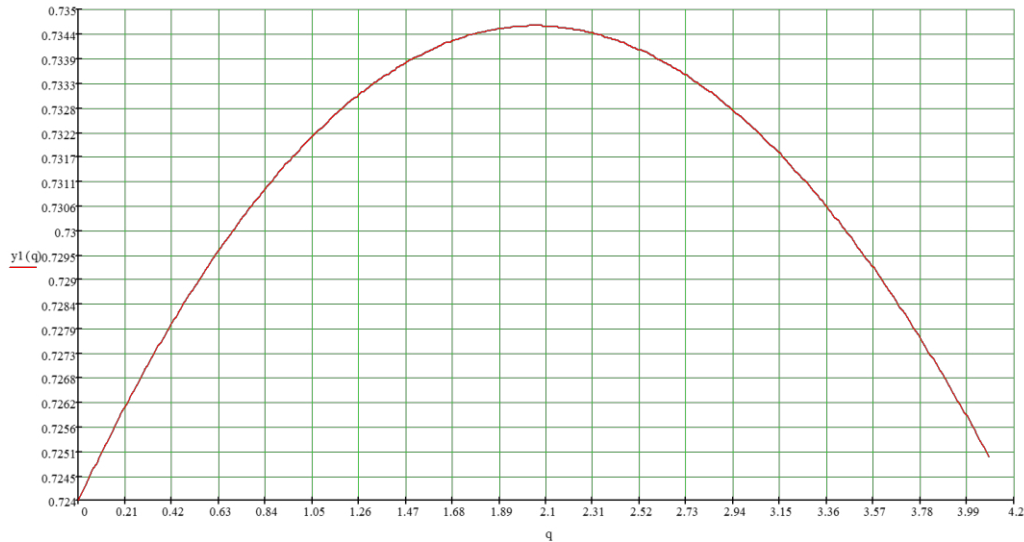


Рисунок 2.20 – Часть графика в котором профиль ведет себе с малыми отклонениями от линейной функции

Т.к производная является тангенсом угла наклона касательной прямой в каждой точке [4] можем найти как меняется угол наклона по кривой. Функция для поиска угла имеет вид (см.Формула (2.68), Рисунок 2.21):

$$\chi_1 = \frac{180 \cdot \arctan(\dot{y}(x))}{\pi} = 57,3 \cdot \arctan\left(\frac{0,0000529 \cdot x^3 - 0,00275 \cdot x^2 + 0,0106 \cdot x + 0,724}{0,0106 \cdot x + 0,724}\right) \quad (2.68)$$

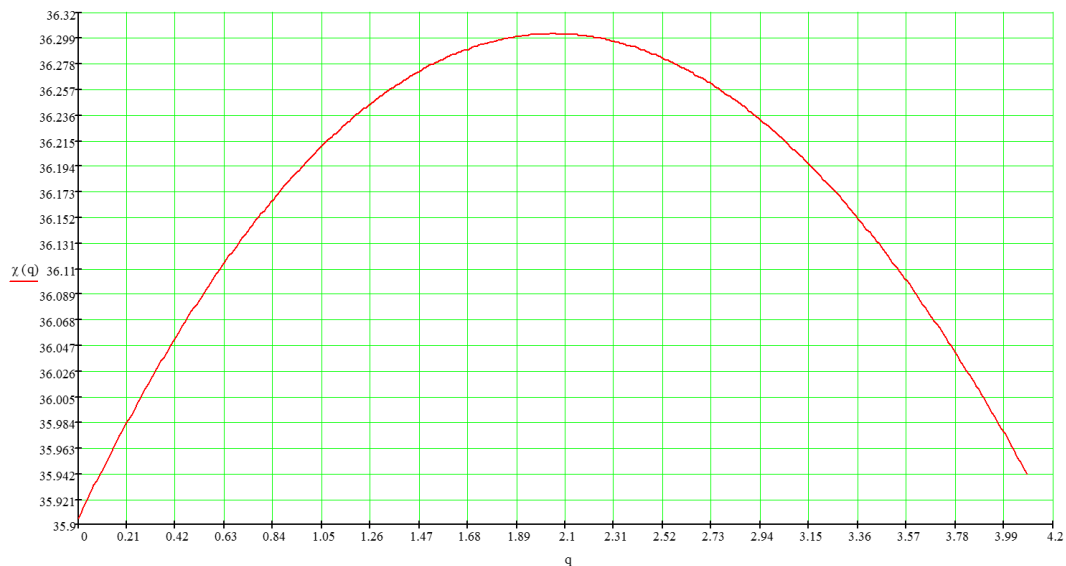
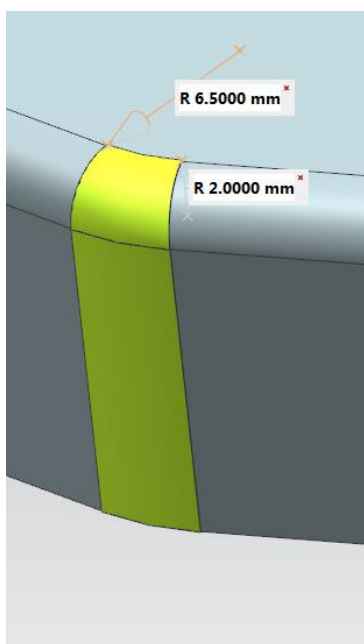


Рисунок 2.21 – График изменения угла наклона

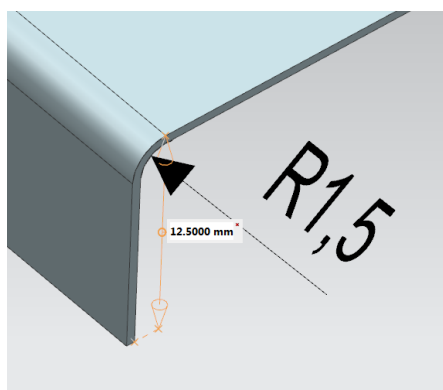
χ_1 изменяется от $35,905^\circ$ до $36,302^\circ$. Что входит в рекомендуемый диапазон от 30° до 50° , чтобы прижим не заклинило при формообразовании.

2.4. Анализ детали №3

Теоретические исследования по поводу второй детали (см. Таблица 2.1) [26] утверждает, что при таких соотношениях возможно появление гофр. Исходя из этого можно рассчитать лишнюю длину при посадке гофры в районе выпуклого участка. Для этого нужно рассчитать участок развертки в этой области (см.Рисунок 2.22).



а)



б)

а) параметры зоны гофообразования б) высота борта и радиусный переход.

Рисунок 2.22 – Параметры детали №3

Длина дуги от радиусного перехода равна (см.Формула (2.69)):

$$l_{\text{рад}} = \frac{\pi}{2} \cdot r = \frac{3,14}{2} \cdot 2\text{мм.} = 3,14\text{мм.} \quad (2.69)$$

Длина борта без радиусного перехода равна разнице высоты борта и минус радиусный переход т.е 10,5 мм. Длина для развертки равна (см.Формула (2.70)):

$$l_{\text{раз}} = 10,5 \text{ мм.} + l_{\text{рад}} = 10,5 \text{ мм.} + 3,14\text{мм.} = 13,642 \text{ мм.} \quad (2.70)$$

Строится развертка с учетом радиуса увеличенного на $l_{\text{раз}}$ (см.Рисунок 2.23):

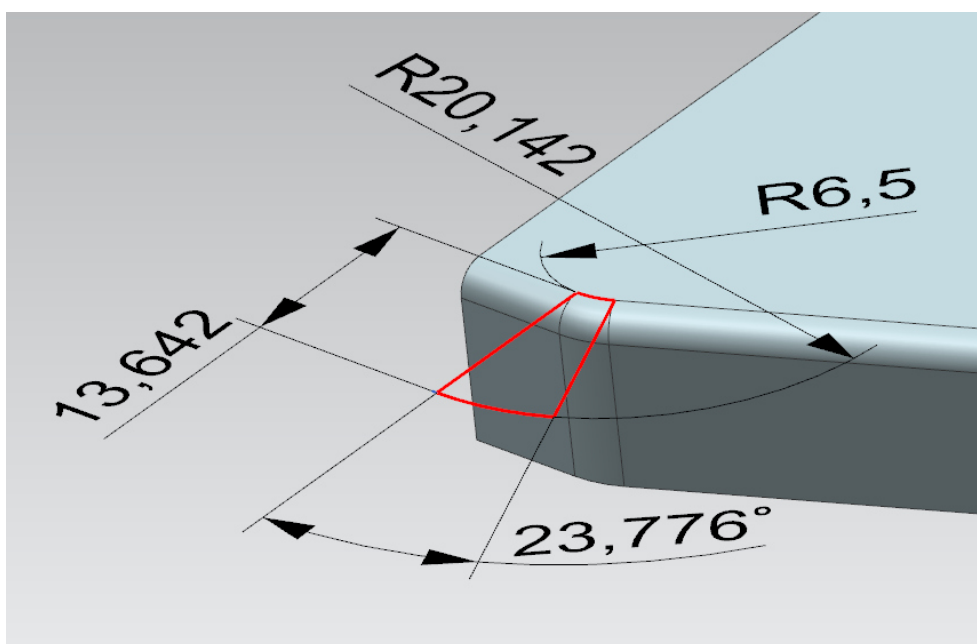


Рисунок 2.23 – Параметры развертки

Исходя из этого ΔL равна имеем [26] (см.Формула (2.71)):

$$\Delta L = \frac{\pi \cdot \gamma \cdot l_{\text{раз}}}{180} = \frac{3,14 \cdot 23,776^\circ \cdot 13,642\text{мм.}}{180} = 5,661\text{мм.} \quad (2.71)$$

Для исключения появления гофр рекомендуется использовать противоотжим [59]. Для этого необходимо рассчитать коэффициент вытяжки K_B (см.Формула (2.72)) и относительной толщины фланца заготовки \bar{s} (см.Формула (2.73)):

$$K_B = \frac{R_3}{R_6} = \frac{20,142\text{мм.}}{6,5\text{мм.}} = 3,099 \quad (2.72)$$

$$\bar{s} = \frac{s}{l_{\text{раз}}} = \frac{0,5\text{мм.}}{13,642 \text{ мм.}} = 0,0366 \quad (2.73)$$

По этим данным есть рекомендации по применению противотжимов из нормативного документа [59]. Однако рекомендаций по полученным данным по традиционным методикам нет (см. Таблица 2.3). И все-таки расчеты показывают образование большой дополнительной длины, что характеризует процесс гофрообразования.

Таблица 2.3– Область применения противотжима

Степень вытяжки	Относительная толщина фланца заготовки $\bar{s} \cdot 100$											
	2,0	2,5	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0
2,8-3,1	???	???	Деталь №3	???	???	???	???	???	???	???	???	???
2,8-2,6			ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО
2,5-2,4		ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО
2,3-2,2	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО
2,1-2,0	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО
1,9-1,7,	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО
1,6-1,4	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО		
1,3-1,15	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО	ПО			

Также по традиционным методикам [26] можно рассчитать потребное усилие для посадки гофра (см. Формулы (2.74),(2.75):

$$q = \left| \frac{R_3 \cdot 0,5 \cdot \gamma}{R_3 \cdot l_{\text{рад}}} \cdot \left(\sigma_0 + \Pi \cdot \left(\left(\frac{l_{\text{рад}}}{R_3 \cdot \gamma} \right) - 1 \right) \right) \right| \quad (2.74)$$

где $R_3 = 20,142$ мм.; $R_6 = 6,5$ мм. ;

$\gamma = 23,776^\circ$, $\Pi = 80$ кГ/мм² ; $\sigma_0 = 15$ кГ/мм² ;

$$q = \frac{20,142 \text{ мм} \cdot 0,5 \cdot 23,776^\circ}{6,5 \text{ мм} \cdot 3,14 \text{ мм}} \cdot \left(15 \text{ кГ/мм}^2 + 80 \text{ кГ/мм}^2 \cdot \left(\left(\frac{3,14 \text{ мм}}{20,142 \text{ мм} \cdot 23,776^\circ} \right) - 1 \right) \right) = 755,923987 \text{ кГ/мм}^2 = 7559 \text{ МПа} \quad (2.75)$$

Данное значение (см.Формула (2.75) показывает не возможность использование данной формулы для детали, выходящей за номограмму.

Допустим, что деформация посадки гофра основная, наибольшая и равна соотношению площади развертки и сумме площадей по этапам фоомообразования конечной части детали. Тогда вычислим площадь на развертки (см.Рисунок 2.24) в области где будет происходить гофрообразование через формулу Брахмагупты (см.Формулы (2.22), (2.23)(где $a = \gamma_{\text{рад}} \cdot R_6; b = d = l_{\text{раз}} = 10,5 \text{ мм} + \left(\frac{\pi}{2} \cdot r\right); c = \gamma_{\text{рад}} \cdot R_z; \gamma_{\text{рад}} = 23,776^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ} = 0,415$) и получим:

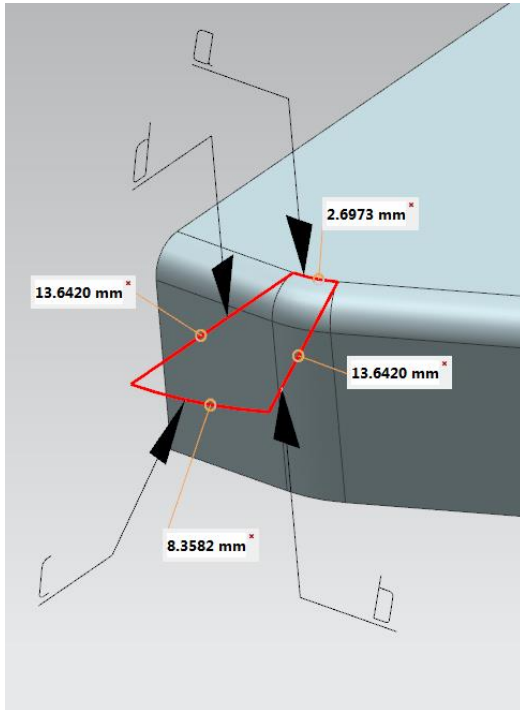


Рисунок 2.24 – Размеры развертки

$$S_5 = 0,25 \cdot \sqrt{0,0593 \cdot R_6^2 \cdot R_3^2 - 0,0297 \cdot R_6^4 + 1,7 \cdot R_6^2 \cdot r_6^2 + 22,7 \cdot R_6^2 \cdot r_6 + 75,9 \cdot R_6^2 + 3,4 \cdot R_6 \cdot R_3 \cdot r_6^2 + 45,4 \cdot R_6 \cdot R_3 \cdot r_6 + 152 \cdot R_6 \cdot R_3 - 0,0297 \cdot R_3^4 + 1,7 \cdot R_3^2 \cdot r_6^2 + 22,7 \cdot R_3^2 \cdot r_6 + 75,9 \cdot R_3^2 + 3,23 \cdot 10^{-27} \cdot r_6^3 + 1,03 \cdot 10^{-25} \cdot r_6 + 4,14 \cdot 10^{-25}} = 73,75047 \text{ мм}^2 \quad (2.76)$$

Находим площадь (где $a_6 = \gamma_{\text{рад}} \cdot R_6$; $b_6 = d_6 = l_{\text{раз}} = 10,5 \text{ мм.} + \left(\frac{\pi}{2} \cdot r\right)$; $c_6 = \gamma_{\text{рад}} \cdot R_{6+}$; $R_{6+} = R_6 + r$) на детали, в которая будет конечной при посадке (см.Рисунок 2.25) гофра (см.Формула (2.77)):

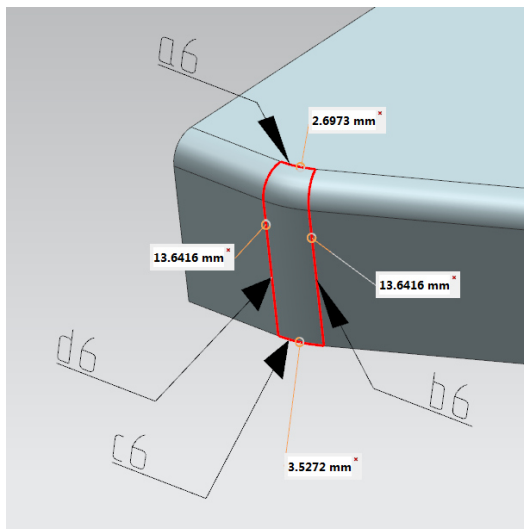


Рисунок 2.25 – Параметры поверхности которая будет конечной при посадке

$$S_6 = 0,25 \cdot \sqrt{0,00000191 \cdot r_6 + 90,9 \cdot R_6 \cdot r_6^2 + 90,9 \cdot R_6^2 \cdot r_6 + 6,68 \cdot R_6 \cdot r_6^3 + 5,82 \cdot 10^{-11} \cdot R_6^3 \cdot r_6 + 304 \cdot R_6^2 + 1,46 \cdot 10^{-11} \cdot R_6^4 + 75,9 \cdot r_6^2 + 22,7 \cdot r_6^3 + 1,67 \cdot r_6^4 + 6,68 \cdot R_6^2 \cdot r_6^2 + 304 \cdot R_6 \cdot r_6 + 0,00000763}$$

$$= 42,448 \text{ мм.}^2 \quad (2.77)$$

Также к вычисленной площади (см.Формула (2.77)) нужно добавить площадь посадки гофры на последнем этапе. Примем что две стороны этой поверхности равны длине дуги радиусного перехода (где $a_5 = c_5 = \gamma_{\text{рад}} \cdot (R_6 + r)$; $b_5 = d_5 = \left(\frac{\pi}{2} \cdot r\right)$) (см.Рисунок 2.26).

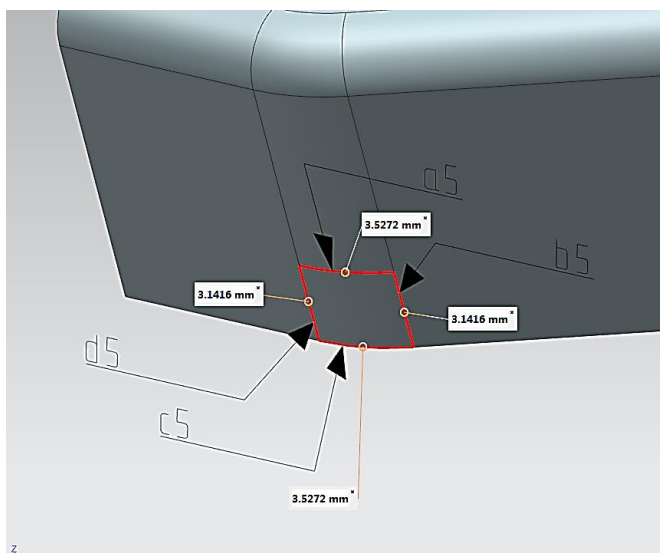


Рисунок 2.26 – Поверхность посадки гофры на последнем этапе

Тогда площадь поверхности посадки гофры на последнем этапе будет равна (см.Формула (2.78):

$$S_7 = 0,25 \cdot \sqrt{\frac{6,8 \cdot R_6^2 \cdot r_6^2 - 2,91 \cdot 10^{-11} \cdot R_6^3 \cdot r_6 - 1,46 \cdot 10^{-11} \cdot R_6^4 + 13,6 \cdot R_6 \cdot r_6^3 + 6,8 \cdot r_6^4}{}} = 11,083 \text{ мм.}^2 \quad (2.78)$$

Деформация при посадке гофры (исходя из нашего допущения) тогда равна (см.Формула (2.79):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{посад}} &= \left(\frac{S_5 - (S_6 + S_7)}{S_5} \right) \cdot 100\% \\ &= \left(\frac{73,750 \text{ мм.}^2 - (42,448 \text{ мм.}^2 + 11,083 \text{ мм.}^2)}{73,750 \text{ мм.}^2} \right) \cdot 100\% = 27,4\% \quad (2.79) \end{aligned}$$

Далее необходимо рассчитать напряжения при посадке. Для описания поведения материала в пластической зоне воспользуемся функцией (см.Формула (2.34) «Кrupkowsky law» [88]. Для Д16АМ $K = 324,17 \text{ МПа}$, $n = 0,2183$; $\varepsilon_0 = 0,0003$ и $\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{посад}} / 100\%$. В нашем случае напряжения равны (см.Формула (2.80):

$$\sigma = 324,17 \text{ МПа} \cdot (0,0003 + 0,274)^{0,2183} = 244,42 \text{ МПа} \quad (2.80)$$

Рассчитывая потребное давление по классическим формулам было получено не адекватно большое давление (7559 МПа (см.Формула (2.75)). Однако эта формула исходит из того что формообразование идет только эластичной средой и показывает, что без дополнительных элементов оснастки такая подсечка не может формообразоваться. Для формообразования данной подсечки нужно локализовать

усилие формообразование на площади гофрообразования. Если предположить, что формообразование подсечки идет жесткий инструментом (повторяющий контур подсечки) приводимым в движение от давление эластичной среды то формообразование подсечки можно разбить на три этапа с тремя площадями как делалось раньше.

Зная напряжения формообразования и суммарную площадь формообразования можно найти потребное усилие [61, 66] формообразования данной подсечки (см.Формула (2.81)):

$$F_{\text{пот1}} = \sigma_{\text{под1}} \cdot (S_5 + S_6 + S_7) =$$

$$244,42\text{МПа} \cdot (73,75047\text{мм.}^2 + 42,448\text{мм.}^2 + 11,083 \text{ мм.}^2) =$$

$$252,627\text{МПа} \cdot 127,281\text{мм.}^2 = 31111,409\text{Н} \quad (2.81)$$

Исходя из утверждений о давлении (см.Формула (2.37)) можно вывести формулу для среднего давления (см.Формула (2.82)):

$$p_{\text{ср}} = q_{\text{пот}} = \frac{F_{\text{пот}}}{S_{\text{пот}}} \quad (2.82)$$

Исходя из этого можно построить график показывающий изменение площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления для детали №3 (см.).

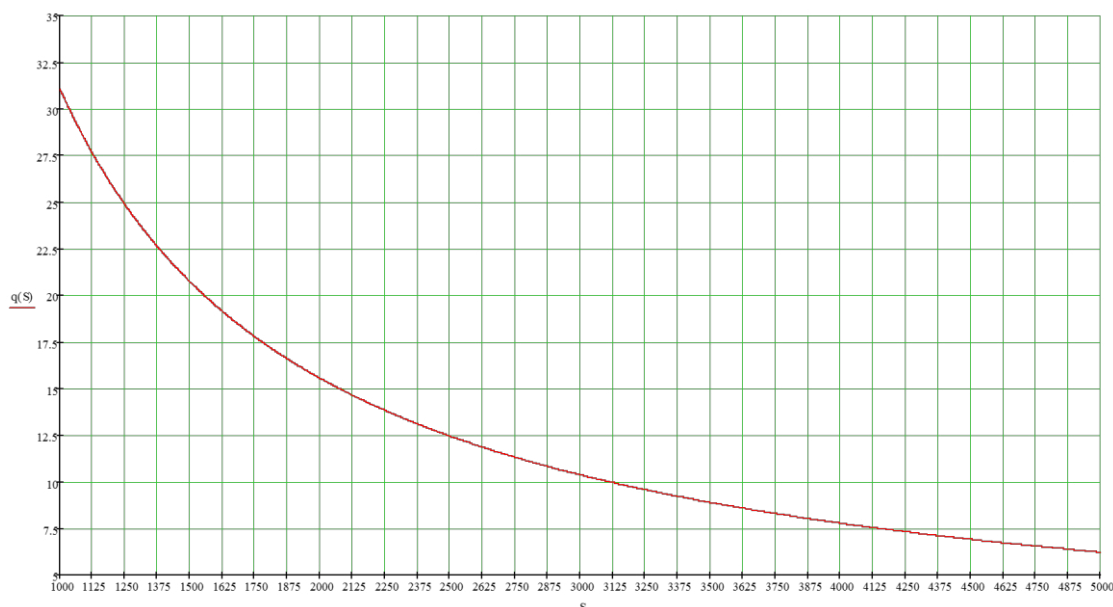


Рисунок 2.27 - График показывающий изменение площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления

По графику видно, что чем меньше площадь воздействия давления на жестком инструменте, тем больше давление. Предположим, что имеется пресс с максимальным давлением 7,5 МПа тогда имеем (см.Формула (2.83):

$$S_{\text{пот1}} = \frac{F_{\text{пот}}}{q_{\text{пот}}} = \frac{31111,409\text{Н}}{7,5 \text{ МПа}} = 4148,188\text{мм}^2 \quad (2.83)$$

Для детали примерный профиль опорной кривой контактной поверхности был выбран в виде сплайновой кривой для более гибкого управления ей (см.Рисунок 2.28).

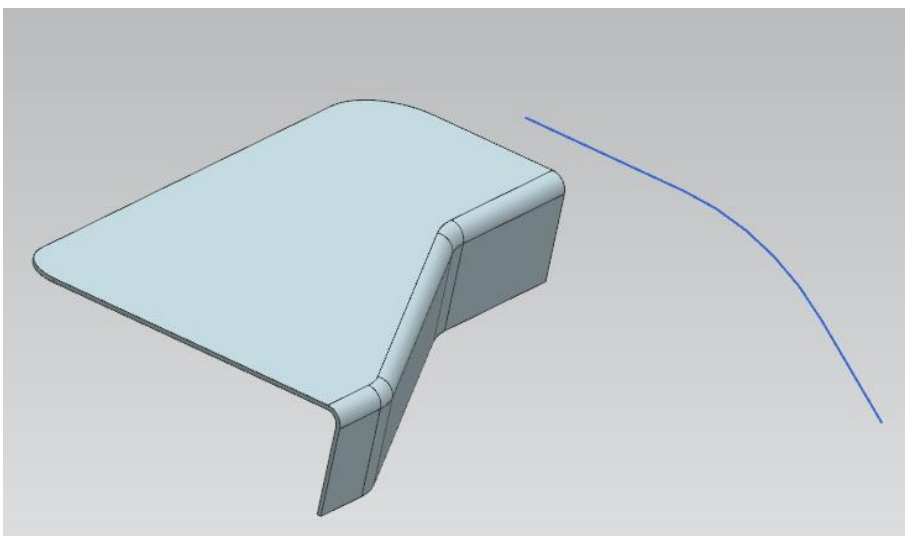


Рисунок 2.28 - Опорная кривая контактной поверхности

Если данный профиль представить в виде графика, то получим картину которую показывает Рисунок 2.29.

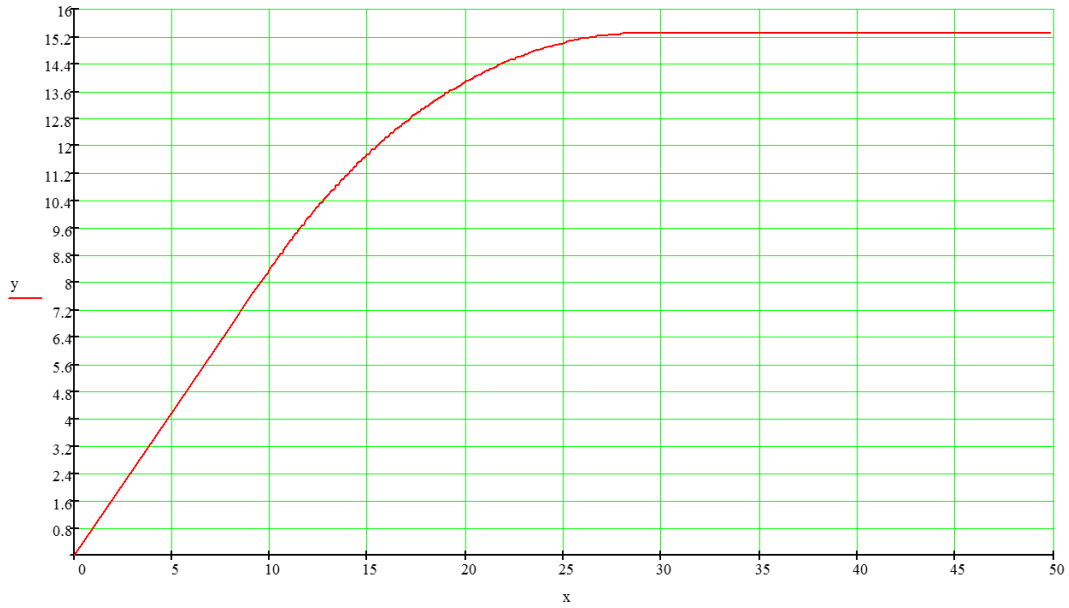


Рисунок 2.29 - Опорная кривая в координат xOy

Для вывода функции данного профиля целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов. Используя алгоритм (см.Формулы (2.46), (2.51), описанный выше и последовательность решения интерполируем профиль кривой полиномом 5 порядка. В результате получим (см.Формула (2.84):

$$y(x) = -0,0429450 + 0,782929 \cdot x + 0,025582 \cdot x^2 - 0,00241 \cdot x^3 + 0,0000536 \cdot x^4 - 0,000000388 \cdot x^5 \quad (2.84)$$

График (см.Рисунок 2.30) показывает совпадение точек профиля и построенной функции.

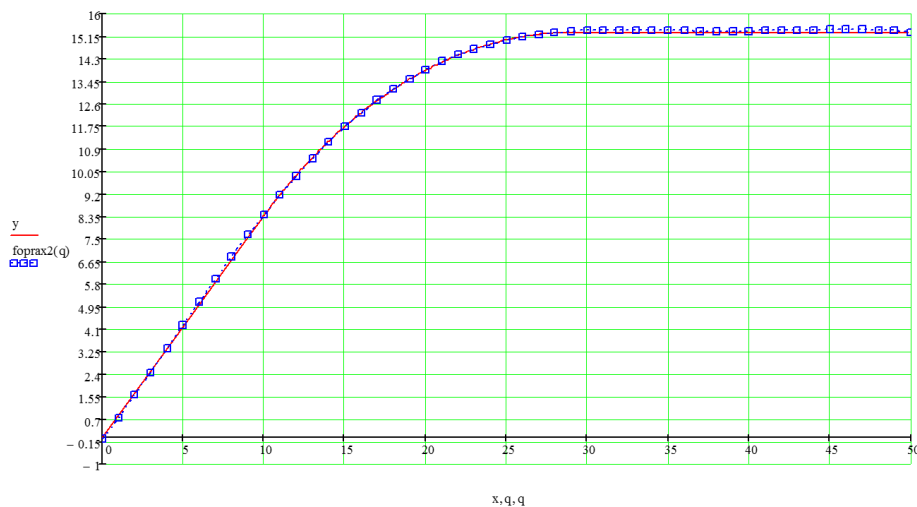


Рисунок 2.30 – Сравнение профиля кривой и функции

Теперь можно составить уравнение поверхности. Если оно не зависит от значения перпендикулярно плоскости профиля оно будет иметь вид (см.Формула (2.85), Рисунок 2.31):

$$z(x, y) = -0,0429450 + 0,782929 \cdot x + 0,025582 \cdot x^2 - 0,00241 \cdot x^3 + 0,0000536 \cdot x^4 - 0,000000388 \cdot x^5 \quad (2.85)$$

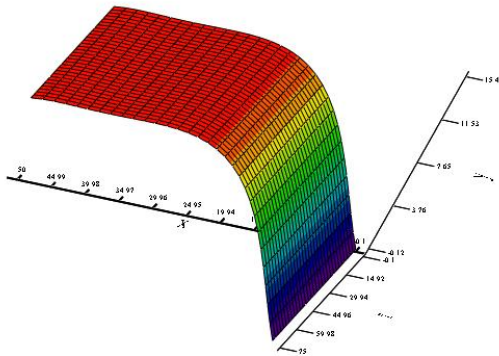


Рисунок 2.31 – Поверхность построенная по уравнению

Однако, чтобы иметь возможность управлять выпуклостью поверхности необходимо добавить в уравнение поверхность переменную y с функцией косинусойды и будем иметь (см.Формула (2.86), Рисунок 2.32):

$$z(x, y) = \left(-0,0429450 + 0,782929 \cdot x + 0,025582 \cdot x^2 - 0,00241 \cdot x^3 + 0,0000536 \cdot x^4 - 0,000000388 \cdot x^5 \right) + \left(-2 \cdot \cos\left(\frac{y}{10}\right) \right) \quad (2.86)$$

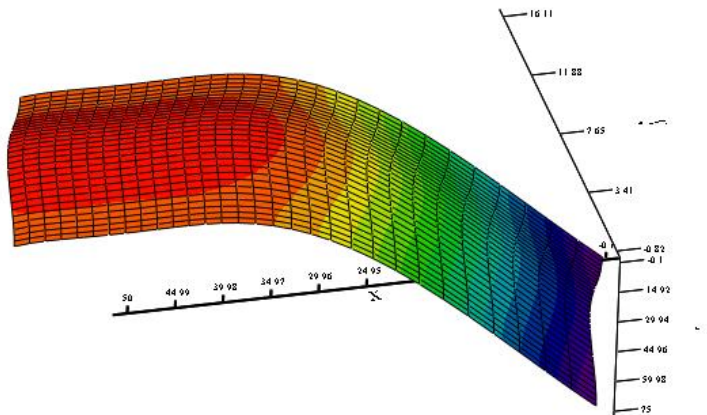


Рисунок 2.32 – Поверхность с выпуклой частью

Данный параметр $\left(-2 \cdot \cos\left(\frac{y}{10}\right)\right)$ можно использовать для вариации площади контакта подвижного элемента с эластичной средой. В общем виде уравнение поверхности будет иметь вид (см.Формула (2.87):

$$z_1(x, y) = (\Psi + \Psi_1 \cdot x + \Psi_2 \cdot x^2 + \Psi_3 \cdot x^3 + \Psi_4 \cdot x^4 + \Psi_5 \cdot x^5) + \left(\Omega_1 \cdot \cos\left(\frac{y}{\Omega_2}\right)\right) \quad (2.87)$$

где $\Psi, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4, \Psi_5$ – коэффициенты контролирующие профиль и позволяющие его модифицировать;

Ω_1 – коэффициент позволяющий менять прогиб в направлении y поверхности и его направленность;

Ω_2 – коэффициент отвечающий за размер периода функции в направлении z ;

Как отмечалось ранее взятие двойного интеграла по поверхности достаточно трудоёмкий процесс расчета (см.Формулы (2.57), (2.58). Имеет смысл заменить вычисления с одинарным интегралом используя формулу Герона для нахождения площади [97] в постановке для четырёхугольника, когда d не стремится к 0 (см.Формула (2.88):

$$S_8 = \sqrt{(p - A_1) \cdot (p - B_1) \cdot (p - C_1) \cdot (p - D_1)} \quad (2.88)$$

где $p_1 = \frac{A_1+B_1+C_1+D_1}{2}$ т.е полупериметр;

A_1, B_1, C_1, D_1 – стороны построенной поверхности;

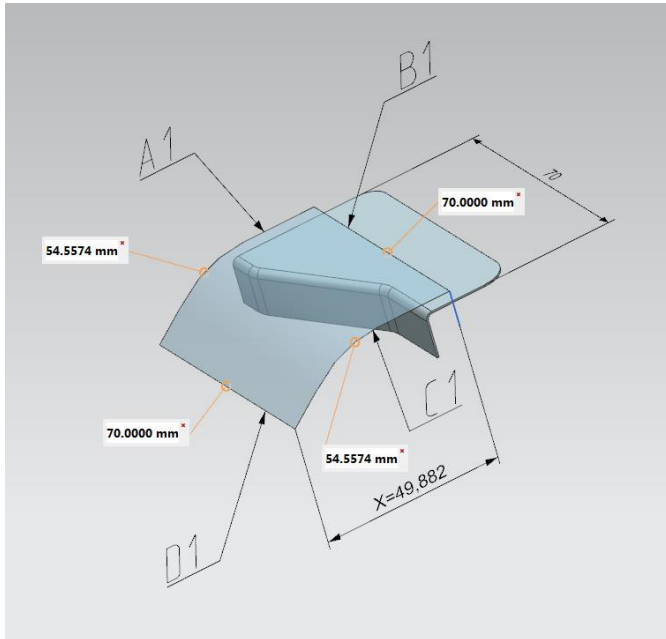


Рисунок 2.33 – Параметры поверхности

Зная уравнение кривой (см.Формула (2.89)) A1 и C1 можно найти с помощью криволинейного интеграла 1 рода [55, 29, 3] длину данной кривой (см.Формула (2.90)):

$$z(x, y) = -0,060389 + 0,723742 \cdot x + 0,005302 \cdot x^2 - 0,000918 \cdot x^3 + 0,000013 \cdot x^4 \quad (2.89)$$

$$A1 = C1 = \int_0^x \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}y(x)\right)^2} dx$$

$$= \int_0^{49,882} \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dx}(-0,0429450 + 0,782929 \cdot x + 0,025582 \cdot x^2 - 0,00241 \cdot x^3 + 0,0000536 \cdot x^4 - 0,000000388 \cdot x^5)\right)^2} dx$$

$$= \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \quad (2.90)$$

Полупериметр в свою очередь равен (см.Формула (2.91)):

$$\begin{aligned}
p &= \frac{A + B + C + D}{2} = \frac{\int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx + B + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx + D}{2} \\
&= 0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \quad (2.91)
\end{aligned}$$

Площадь из этого равна (при $B = D = 70$ мм. т.е. ширине детали.) (см. Формула (2.92)):

$$\begin{aligned}
S_{\text{rep1}} &= \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) - \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) \cdot \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) - B \right) \cdot \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) - \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) \cdot \left(\left(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) - D \right) \\
&= \sqrt{(0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D)^2 \cdot \left(-0,5 \cdot B + 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right) \cdot \left(0,5 \cdot B - 0,5 \cdot D + \int_0^{49,882} \sqrt{3,7636 \cdot 10^{-12} \cdot x^8 - 8,3032 \cdot 10^{-10} \cdot x^7 + 7,38484 \cdot 10^{-8} \cdot x^6 - 0,00000329 \cdot x^5 + 0,0000711 \cdot x^4 - 0,000405 \cdot x^3 - 0,00870074 \cdot x^2 + 0,0801792 \cdot x + 1,613089} dx \right)} \\
&= 4094,510 \text{ мм.}^2 \quad (2.92)
\end{aligned}$$

Однако $S_{\text{пот1}} = 4148,188 \text{ мм}^2$ превышает S_{rep1} что говорит о том что необходимо увеличить B и D до 75 мм. В результате площадь увеличится до $S_{\text{rep1}} = 4094,510$ что отличается от $S_{\text{пот1}}$ в меньшую сторону менее 2%.

Однако в связи с тем, что при формовке такого рода подсечки будет идти интенсивное гофрообразование первый переход нельзя проводить на максимуме

давление т.к это приведёт к избыточному упрочнению в зоне гофры и уменьшению ее размера. Все это приведет к значительному увеличению потребного усилия формообразования и как следствие увеличению потребной площади контакта эластичной среды и подвижного элемента оснастке. На первом переходе нужно использовать малое давление чтобы гофра имела большую амплитуду волны при потере устойчивости. Для определения данного давления выразим длину развертки через величину которая будет иметь радиальное сжатие и будет уменьшаться на длину ΔL (см.Рисунок 2.34).

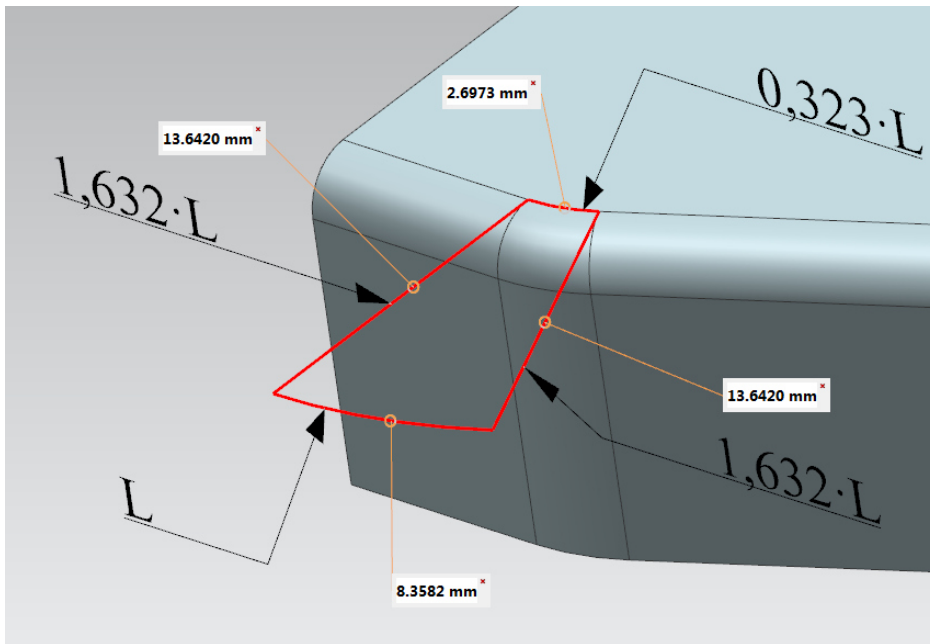


Рисунок 2.34 – Введение переменной L

Допустим, что все стороны уменьшаются в процессе посадки сохраняя показанную пропорцию в начальный момент формообразования. Тогда по формуле Брахмагупты (см.Формулы (2.22), (2.23) площадь будет равна (см.Формула (2.93):

$$S_{\text{нач.}} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\begin{vmatrix} 0,322 \cdot L & 1,632 \cdot L & L & -1,632 \cdot L \\ 1,632 \cdot L & 0,322 \cdot L & -1,632 \cdot L & L \\ L & -1,632 \cdot L & 0,322 \cdot L & 1,632 \cdot L \\ -1,632 \cdot L & L & 1,632 \cdot L & 0,322 \cdot L \end{vmatrix}}$$

$$= 0,25 \cdot \sqrt{17,8 \cdot L^4} \quad (2.93)$$

В общем виде эта формула имеет вид (см. Формула (2.94):

$$S_{\text{нач.}} = 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot (4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 + 8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1)} \quad (2.94)$$

где t -коэффициент зависимости от L большей стороны развертки (в нашем случае 1,632);

y -коэффициент зависимости от L меньшей стороны развертки (в нашем случае 0,322);

Выразим напряжения через функцию «Kuprkowsky law» (см.Формула (2.34) [88]). При этом пластические деформации выразим как соотношение площадей площадь развертки в области гофрообразования к текущей площади гофрообразования. В результате получим (см.Формула (2.95):

$$\begin{aligned} \varepsilon_p = \frac{S5 - S_{\text{нач.}}}{S5} &= \frac{S5 - 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot (4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 + 8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1)}}{S5} \\ &= \frac{73,75 \text{ мм.}^2 - 0,25 \cdot \sqrt{17,8 \cdot L^4}}{73,75 \text{ мм.}^2} \end{aligned} \quad (2.95)$$

где K - математическая постоянная данного материала;

n - коэффициент деформационного упрочнения;

ε_0 – деформация отсчета начала пластических деформаций;

Для Д16АМ $K= 324,17$ МПа, $n= 0,2183$; $\varepsilon_0=0,0003$;

Тогда для напряжения имеем (см.Формула (2.96):

$$\begin{aligned} \sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n &= K \left(\varepsilon_0 + \left(\frac{S5 - 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot (4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 + 8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1)}}{S5} \right) \right)^n \\ &= K \left(\frac{S5 + S5 \cdot \varepsilon_0 - 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot (4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 + 8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1)}}{S5} \right)^n \end{aligned}$$

$$= 324,17 \text{ МПа} \left(\frac{73,75 \text{ мм.}^2 + 73,75 \text{ мм.}^2 \cdot 0,0003 - 0,25 \cdot \sqrt{17,8 \cdot L^4}}{73,75 \text{ мм.}^2} \right)^{0,2183} \quad (2.96)$$

Т.к мы рассматриваем начальный момент формообразования величина L меняется незначительно. Из этого следует что изменение данной функции будет происходить в малом диапазоне. Рассмотрим диапазон от 7.5 до $L=8,3582$ (см.Рисунок 2.35).

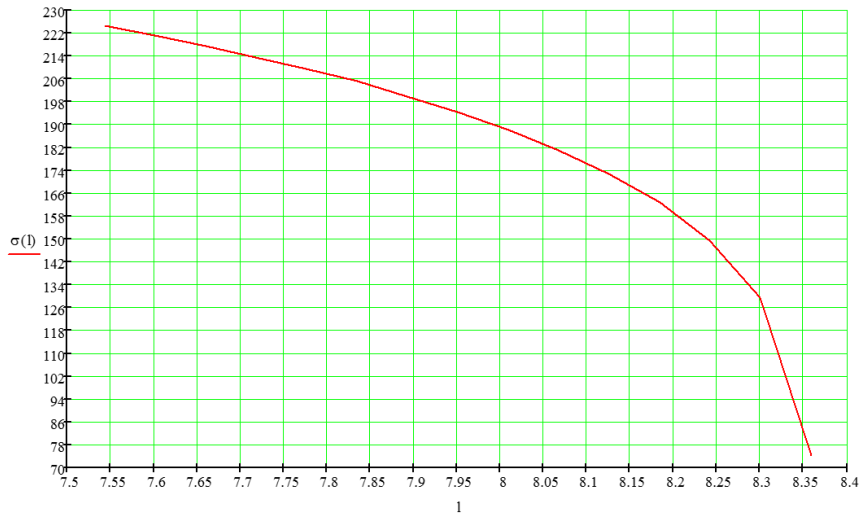


Рисунок 2.35 – График зависимости напряжения от L

Зная величину давления можно рассчитать величину потребного давления на первом переходе исходя из того, что формообразующая сила распределена на всю площадь детали (см.Рисунок 2.36,Формула (2.97))(в нашем случае $3116,0741 \text{ мм.}^2$).

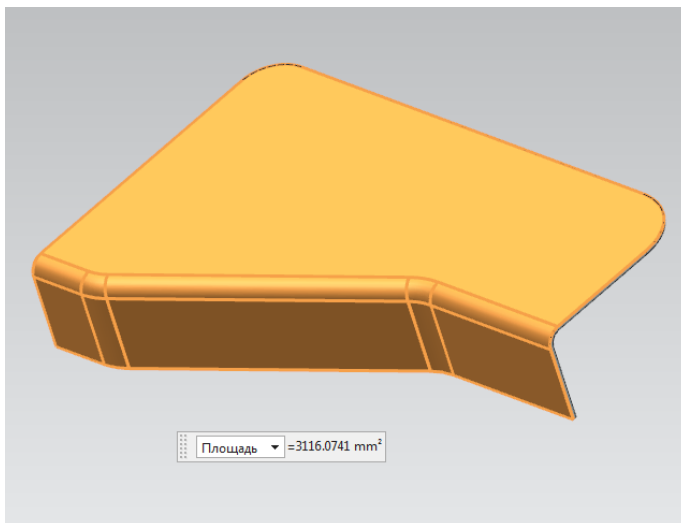


Рисунок 2.36 – Площадь детали

$$\begin{aligned}
 q_{\text{пот}} &= \frac{\sigma \cdot S_{\text{нач.}}}{S_{\text{д}}} \\
 &= \frac{K \left(\varepsilon_0 + \left(\frac{S5 - 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot \left(\frac{4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 +}{8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1} \right)}}{S5} \right)^n \cdot 0,25 \cdot \sqrt{L^4 \cdot \left(\frac{4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 +}{8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1} \right)} \right)}{S_{\text{д}}} \\
 &= \frac{0,25^{n+1} \cdot K \cdot \sqrt{L^4 \cdot \left(\frac{4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 +}{8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1} \right)} \cdot \left(\frac{4 \cdot S5 + 4 \cdot S5 \cdot \varepsilon_0 - \sqrt{L^4 \cdot \left(\frac{4 \cdot t^2 \cdot y^2 - 1 \cdot t^4 + 2 \cdot t^2 +}{8 \cdot t \cdot y^2 + 4 \cdot y^2 - 1} \right)}}{S5} \right)}{S_{\text{д}}} \\
 &= \frac{0,25^{n+1} \cdot K \cdot \sqrt{17,8 \cdot L^4} \cdot \left(\frac{4 \cdot S5 + 4 \cdot S5 \cdot \varepsilon_0 - \sqrt{17,8 \cdot L^4}}{S5} \right)}{S_{\text{д}}} \\
 &= \frac{0,25^{0,2183+1} \cdot 324,17 \text{ МПа} \cdot \sqrt{17,8 \cdot L^4} \cdot \left(\frac{4 \cdot 73,75 \text{ мм.}^2 + 4 \cdot 73,75 \text{ мм.}^2 \cdot 0,0003 - \sqrt{17,8 \cdot L^4}}{73,75 \text{ мм.}^2} \right)}{3116,0741 \text{ мм.}^2} \quad (2.97)
 \end{aligned}$$

В результате получаем график (см.Рисунок 2.37).

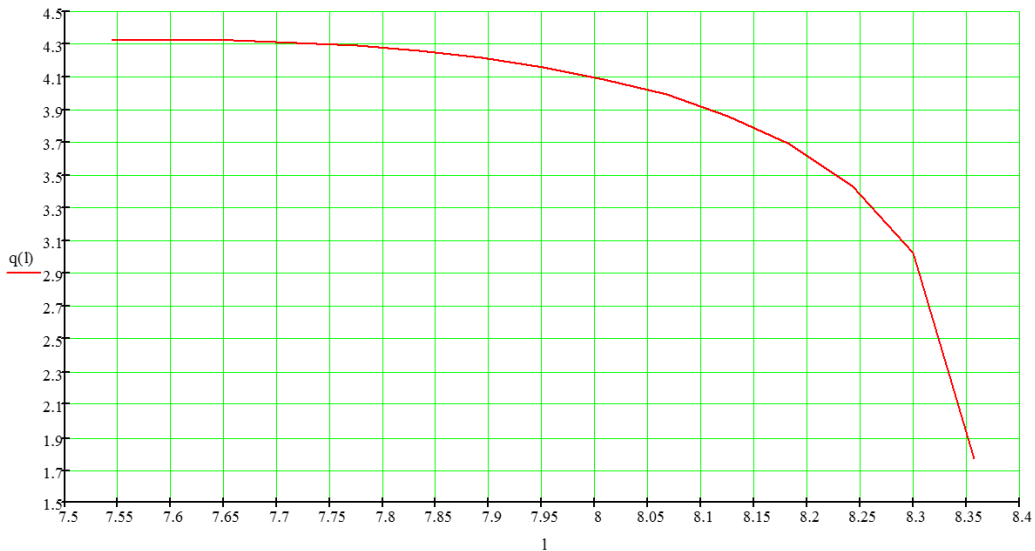


Рисунок 2.37 – График требуемого давления от L

Например, для нашего случая для L=8,2 мм. величина требуемого давления равна 3,627 МПа.

Для обеспечения движения подвижного прижима необходимо чтобы выдерживался угол наклона кривой профиля в диапазоне от 30 до 50 градусов в противном случае возможно заклинивание прижима при движении. Для того чтобы найти угол наклона нужно взять производную от функции профиля [4](см.Формула (2.98), Рисунок 2.38)

$$\dot{y}(x) = 0,000214 \cdot q^3 - 0,00000194 \cdot q^4 - 0,00723 \cdot q^2 + 0,0512 \cdot q + 0,783 \quad (2.98)$$



Рисунок 2.38 – График зависимости производной профиля кривой от его размера

Т.к нас интересует область начала профиля кривой (см.Рисунок 2.30) (примерно 0 до 10) график примет вид который показывает Рисунок 2.39.

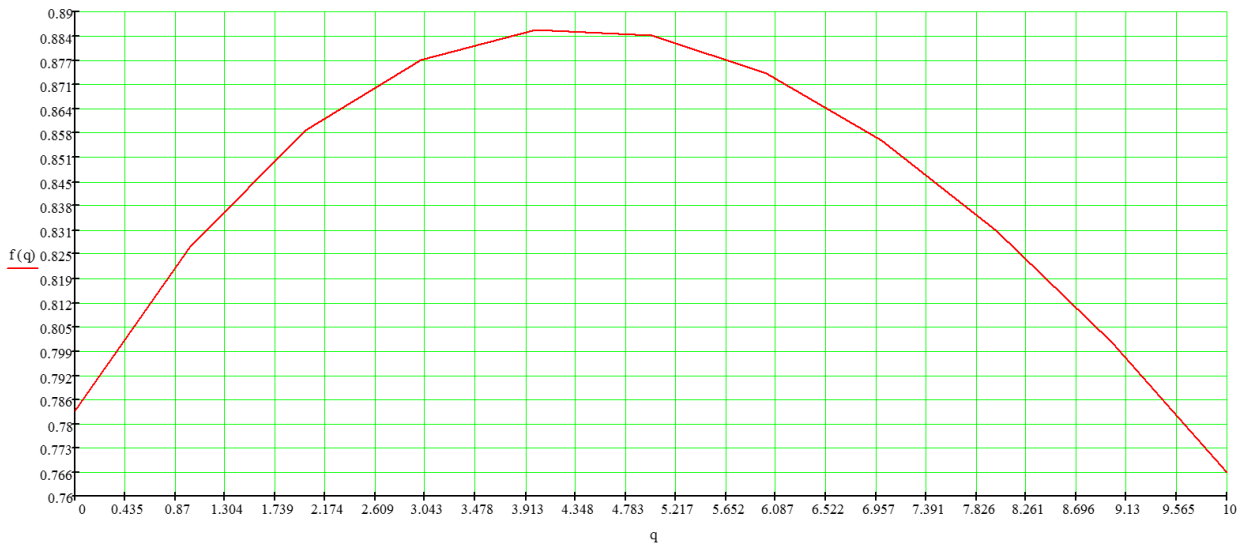


Рисунок 2.39 - График зависимости производной профиля кривой в выбранном диапазоне

По методикам поиска экстремума [58] находим значение максимума производной $y'(4,326) = 0,886$. Т.е из этого участка при котором функция ведет себе с малыми отклонениями от линейной функции можно принять как $2 \cdot 4,326 = 8,652$ (см.Рисунок 2.40).

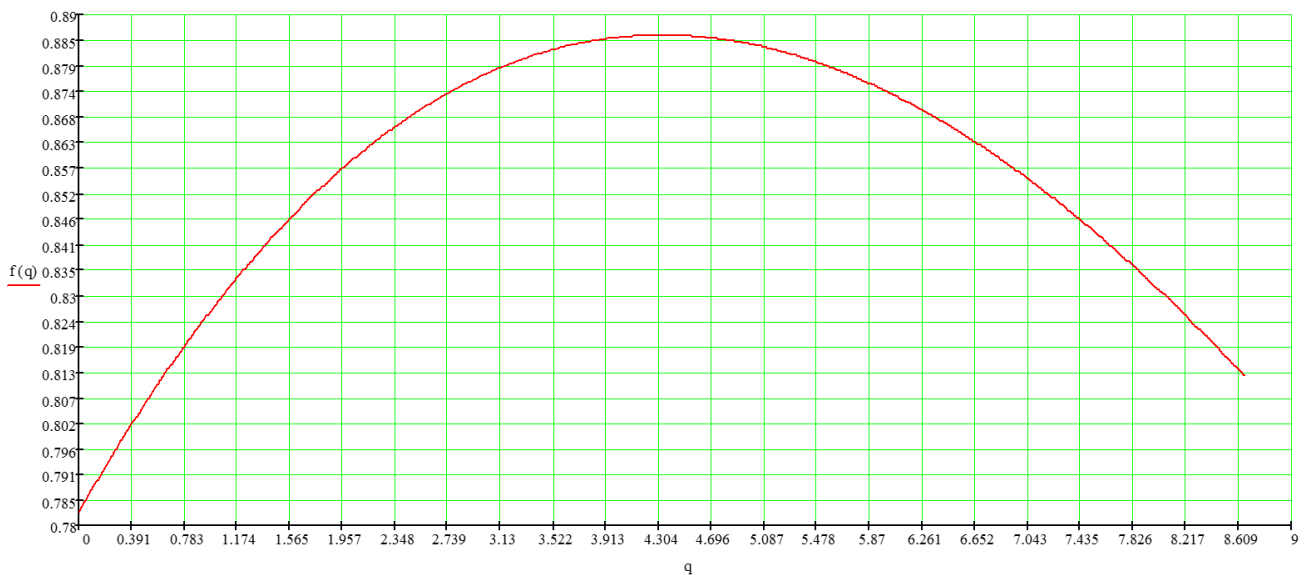


Рисунок 2.40 – Диапазон где профиль кривой ведет себя линейно

Т.к производная является тангенсом угла наклона касательной прямой в каждой точке [4] можем найти как меняется угол наклона по кривой. Функция для поиска угла имеет вид (см.Формула(2.99),Рисунок 2.41).

$$\chi_1 = \frac{180 \cdot \arctan(\dot{y}(x))}{\pi}$$

$$= 57,3 \cdot \arctan\left(\frac{0,000214 \cdot q^3 - 0,00000194 \cdot q^4 -}{0,00723 \cdot q^2 + 0,0512 \cdot q + 0,783}\right) \quad (2.99)$$

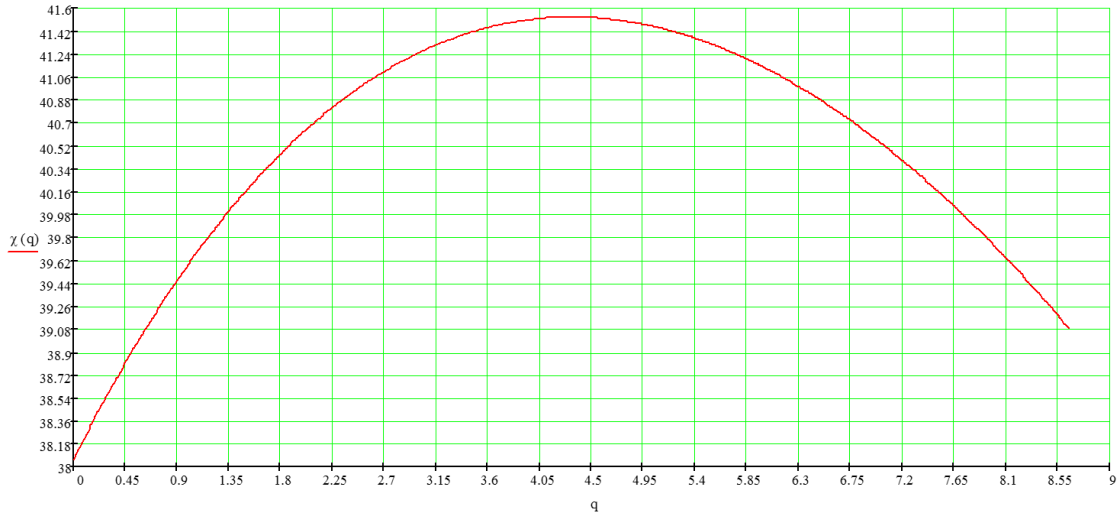


Рисунок 2.41 – График зависимость угла наклона от длины профиля кривой

χ_1 изменяется от $38,058^\circ$ до $41,512^\circ$, что входит в диапазон от 30° до 50° .

Для определения утонения на детали определим место где будет происходить утонение на детали воспользуемся научными данными [26]. В результате имеем картину, которую показывает Рисунок 2.42.

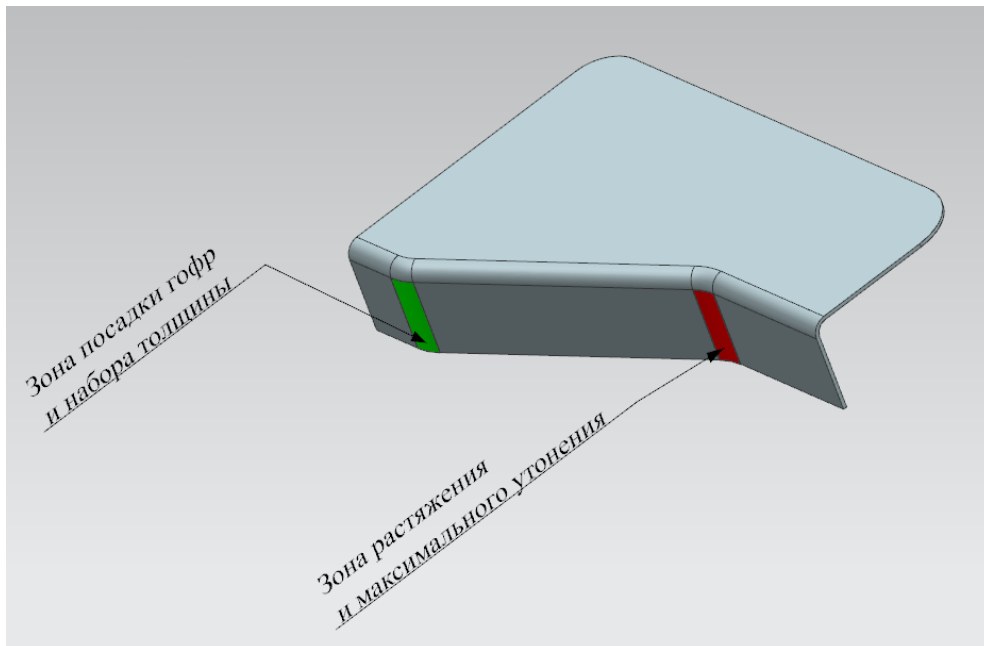


Рисунок 2.42 – Зоны образования гофр и утонения

Допустим, что в зоне максимального утонения через соотношение площадей можно определить деформацию утонения аналогично подходу для детали №2 (см.Рисунок 2.43).

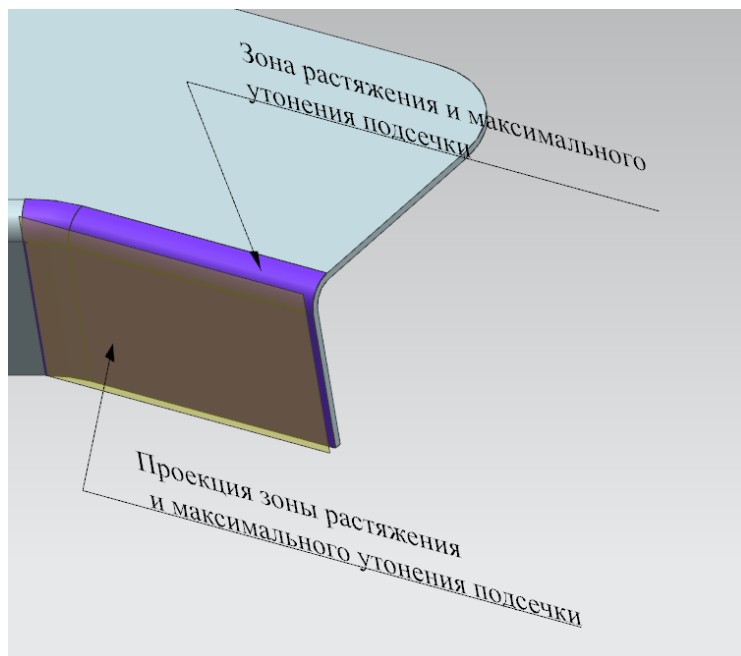
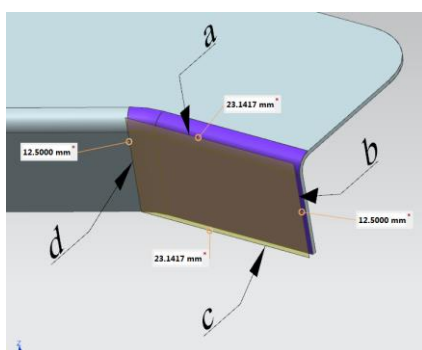
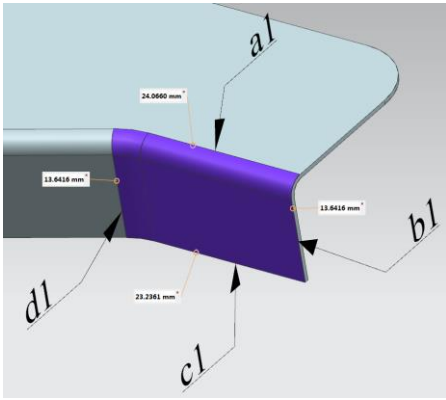


Рисунок 2.43 – Зоны для расчета утонения

Исходя из размеров поверхностей можем найти площадь по формуле Брахмагупты (см.Формулы (2.22), (2.23)). Тогда для интересующих площадей поверхностей (см.Рисунок 2.44) будем иметь (см.Формулы (2.100), (2.101)):



a)



б)

а) проекция зоны растяжения; б) Зона растяжения и максимального утонения.

Рисунок 2.44 – Размеры поверхностей интересующих зон

$$S_{\text{подпроект}} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{-\begin{vmatrix} a & b & c & -d \\ b & a & -d & c \\ c & -d & a & b \\ -d & c & b & a \end{vmatrix}} = 0,25 \cdot \sqrt{\begin{matrix} 2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + \\ 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - \\ b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 \\ -c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4 \end{matrix}}$$

$$= 0,25 \cdot \sqrt{\begin{matrix} 2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 \cdot (12,5\text{мм})^2 - (23,1417\text{мм})^4 + 2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 + \\ 2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 \cdot (12,5\text{мм})^2 + 8 \cdot (23,1417\text{мм}) \cdot (12,5\text{мм}) \cdot (23,1417\text{мм}) \cdot (12,5\text{мм}) - \\ (12,5\text{мм})^4 + 2 \cdot (12,5\text{мм})^2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 + 2 \cdot (12,5\text{мм})^2 \cdot (12,5\text{мм})^2 \\ - (23,1417\text{мм})^4 + 2 \cdot (23,1417\text{мм})^2 \cdot (12,5\text{мм})^2 - (12,5\text{мм})^4 \end{matrix}}$$

$$= 289,271 \text{ мм}^2 \quad (2.100)$$

$$S_{\text{под}} = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{-\begin{vmatrix} a1 & b1 & c1 & -d1 \\ b1 & a1 & -d1 & c1 \\ c1 & -d1 & a1 & b1 \\ -d1 & c1 & b1 & a1 \end{vmatrix}} = 0,25 \cdot \sqrt{\begin{matrix} 2 \cdot a1^2 \cdot b1^2 - a1^4 + 2 \cdot a1^2 \cdot c1^2 + \\ 2 \cdot a1^2 \cdot d1^2 + 8 \cdot a1 \cdot b1 \cdot c1 \cdot d1 - \\ b1^4 + 2 \cdot b1^2 \cdot c1^2 + 2 \cdot b1^2 \cdot d1^2 \\ -c1^4 + 2 \cdot c1^2 \cdot d1^2 - d1^4 \end{matrix}}$$

$$= 0,25 \cdot \sqrt{\begin{matrix} 2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 - (24,0660\text{мм})^4 + 2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 + \\ 2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 + 8 \cdot (24,0660\text{мм}) \cdot (13,6416\text{мм}) \cdot (24,0660\text{мм}) \cdot (13,6416\text{мм}) - \\ (13,6416\text{мм})^4 + 2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 + 2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 \\ - (24,0660\text{мм})^4 + 2 \cdot (24,0660\text{мм})^2 \cdot (13,6416\text{мм})^2 - (13,6416\text{мм})^4 \end{matrix}}$$

$$= 328,298\text{мм}^2 \quad (2.101)$$

Минимальная толщина после формообразования, вследствие допущения, равна (см.Формула (2.102):

$$S_{i(\min)} = S_0 - \frac{\varepsilon \cdot S_0}{100\%} \quad (2.102)$$

Деформация ε по толщине вычисляемая по формуле (2.103):

$$\varepsilon = \frac{S_{\text{под}} - S_{\text{под_проект}}}{S_{\text{под}}} \cdot 100\% \quad (2.103)$$

Подставляя значения формулы (2.103) в формулу (2.102) получим (см.Формула (2.104):

$$\varepsilon = \frac{328,298\text{мм.}^2 - 289,271\text{мм.}^2}{328,298\text{мм.}^2} \cdot 100\% = 11,9\% \quad (2.104)$$

И тогда минимальная толщина равна (см.Формула (2.105):

$$S_{i(\min)} = 0,5\text{мм.} - \frac{11,9\% \cdot 0,5\text{мм.}}{100\%} = 0,441\text{мм.} \quad (2.105)$$

В общем виде формула для нахождения минимальной толщины выглядит следующим образом (см.Формула (2.106):

$$S_{i(\min)} = \frac{S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}{2 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}}}{\sqrt{8 \cdot a^2 \cdot b^2 - a^4 + 2 \cdot a^2 \cdot c^2 + 2 \cdot a^2 \cdot d^2 + 8 \cdot a \cdot b \cdot c \cdot d - b^4 + 2 \cdot b^2 \cdot c^2 + 2 \cdot b^2 \cdot d^2 - c^4 + 2 \cdot c^2 \cdot d^2 - d^4}} \quad (2.106)$$

2.5. Выводы

1. Разработано уравнение приводящей поверхности подвижного прижима для правой и левой части номограммы.

2. Разработана математическая модель для расчета утонения и деформации утонения в зоне подсечек исходя из допущений модели Брахмагупты и правила Саррюса.

3. Разработана математическая модель для расчета полной деформации формообразования для правой и левой части номограммы.

4. Разработана математическая модель для расчета потребной площади приводящей поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования.

5. Для правой части номограммы разработано математическая модель для определения потребного давления на первом переходе.

6. Разработана методика определения угла наклона в начале профиля опорной кривой используя анализ экстремумов и дифференцирования функции профиля опорной кривой.

3. Верификация предложенных математических моделей с моделированием процесса формообразования методом конечных элементов

Метод конечных элементов — это численная процедура решения задач, сформулированных в виде дифференциального уравнения или вариационного принципа. Метод конечных элементов отличается от классических методов Ритца и Галеркина тем, что аппроксимирующая функция является линейной комбинацией непрерывных кусочно-гладких финитных функций. Финитные функции отличны от нуля только в заданном интервале. В методе конечных элементов под такими интервалами подразумеваются конечные элементы, на которые разбивается область V .

3.1. Описание метода конечных элементов

Термин метод конечных элементов, в действительности, определяет широкий спектр вычислительных технологий в соответствии с некоторыми общими свойствами. Процесс конечно-элементного анализа включает определенную последовательность шагов. Перечислим эти шаги:

1. Дискретизация области: построение сетки, задание свойств (материала.) элементов. Область, на которой решается задача, аппроксимируется (покрывается) непересекающимися подобластями простого типа, которые называются конечными элементами (КЭ). Множество элементов, на которые разбита область, называется конечно-элементной сеткой. Вершины КЭ называются узлами. Узлы предназначены для описания геометрии элемента и для задания компонент решения (неизвестная величина задается в узлах). Узлы могут быть внешними и внутренними. Внешние узлы лежат на границе КЭ и используются для соединения элементов друг с другом. Также узлы могут располагаться между угловыми узлами. КЭ может иметь и внутренние узлы, такие элементы обеспечивают более точное описание искомым функций. Компоненты решения в узле называются степенями свободы. В зависимости от рассматриваемых задач

число степеней свободы в узле различно. Например, если рассматривается задача теплопроводности, в каждой точке ищется одно значение температуры — одна степень свободы. А если рассматривается двумерная задача упругости относительно неизвестных перемещений, то число компонент будет равно двум, так как перемещение величина векторная $u = (u_x, u_y)$. В качестве степеней свободы могут фигурировать как узловые значения неизвестной функции, так и ее производные по пространственным координатам в узлах. Кроме того необходимо задать свойства материала, из которого изготовлена конструкция или КЭ. Например, для изотропных тел при решении задач теории упругости необходимо знать такие константы, как модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала, при решении задачи теплопроводности — коэффициент теплопроводности;

2. Выбор аппроксимирующих (базисных) функций. Чаще всего базисные функции выбираются в виде полиномов. Поэтому пространство, на котором ищется решение, является пространством кусочно-полиномиальных функций. Базисные функции могут иметь различный порядок: линейный, квадратичный, кубичный и т.д;

3. Формирование системы линейных алгебраических уравнений с учетом вкладов от элементов и узлов, введение граничных условий в систему уравнений. Например, если задача решается с помощью метода Галёркина (метода взвешенных невязок) [11, 91, 92] формируются интегралы от произведения невязки на весовые функции, которые затем приравниваются к нулю. Если решается задача в вариационной постановке с помощью метода Ритца минимизации функционала, то системы линейных алгебраических уравнений получается после приравнивания к нулю производных функционала. Интегралы по области разбиваются на интегралы по элементам (см. Формула (3.1)):

$$\int_V \omega_l \cdot R \cdot dV = \sum_{e=1}^M \int_{V^e} \omega_l \cdot R \cdot dV \quad (3.1)$$

И далее вычисляются элементные матрицы и элементные векторы, из которых формируются глобальная матрица и вектор правых частей системы.

4. Решение системы уравнений;

5. Определение расчетных величин в элементах. Этими величинами обычно являются производные от неизвестной функции (например, деформации, напряжения, тепловые потоки, скорости);

Точное решение дифференциального уравнения при подстановке в это дифференциальное уравнение обращает его в тождество в каждой точке. Решение МКЭ предполагает, что приближенное решение \bar{u} будет удовлетворять дифференциальному уравнению в узлах сетки $\bar{u}(x_i) = u(x_i) = u_i$.

Основная идея МКЭ состоит в том, что:

- любую непрерывную величину (например, температуру, давление, перемещение) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определённых на конечном числе подобластей (элементов);

- кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

При построении дискретной модели непрерывной величины поступают следующим образом:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми (или просто узлами);

2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена;

3. Область определения непрерывной величины разбивается на конечное число подобластей, называемых элементами (или конечными элементами). Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области;

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом (или какой-либо другой функцией), который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранилась непрерывность величины вдоль границ элемента. Этот полином называют ещё функцией элемента;

При построении дискретной модели непрерывной величины, определённой в двух- или трёхмерной области, основная концепция МКЭ используется аналогично.

В двумерном случае элементы описываются функциями от x , y . При этом чаще всего рассматриваются элементы в форме треугольника или четырёхугольника.

Окончательной аппроксимацией двумерной непрерывной величины $T(x,y)$ будет служить совокупность кусочно-непрерывных поверхностей, каждая из которых определяется на отдельном элементе с помощью значений $T(x,y)$ в соответствующих узловых точках. В качестве функции элемента чаще всего применяется полином. Порядок полинома зависит от числа используемых в каждом узле элемента данных о непрерывной функции. Классификация конечных элементов может быть проведена в соответствии с порядком полиномиальных функций этих элементов.

При этом рассматриваются три следующие группы элементов:

– симплекс-элементы [79, 38]. Симплекс-элементам соответствуют полиномы, содержащие константу и линейные члены.

Число коэффициентов в таком полиноме на единицу больше размерности координатного пространства.

Например, симплексная функция для двумерного треугольного элемента (см. Формула (3.2)):

$$\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y \quad (3.2)$$

– комплекс-элементы. Комплекс-элементам соответствуют полиномиальные функции, содержащие константу, линейные члены, а также члены второго, третьего и более высокого порядка, если это необходимо.

Форма комплекс-элементов может быть такой же, как и у симплекс-элементов, но комплекс-элементы имеют дополнительные граничные узлы и, кроме того, могут иметь также и внутренние узлы;

– мультиплекс-элементы. Для мультиплекс-элементов также используются полиномы, содержащие члены высокого порядка, но границы элементов при этом должны быть параллельны координатным осям, что необходимо для достижения непрерывности при переходе от одного элемента к другому. Границы симплекс- и комплекс-элементов не подвергаются такому ограничению.

Рассмотрим 3-х мерное тело, нагруженное внешними силами и помещенное в систему координат x, y, z (см.Рисунок 3.1). Под действием внешних сил тело деформируется. При деформировании произвольная точка g смещается по координатным осям. Компоненты смещения произвольной точки тела в теории упругости обозначают $u = u(x, y, z)$, $v = v(x, y, z)$, $w = w(x, y, z)$. Положительные смещения направлены в положительном направлении координатных осей.

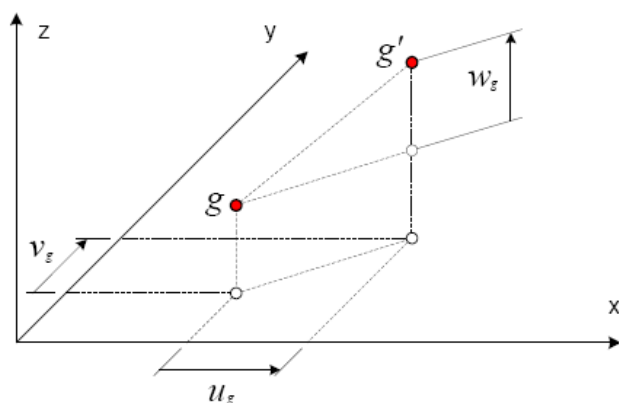


Рисунок 3.1 – Визуальное представление примера

Элементарный бесконечно малый объем тела $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ в процессе деформирования всей конструкции изменяет свои линейные размеры и изменяет форму.

Для упрощения рассмотрим процесс изменения размеров и формы на двумерной проекции, исключив третью координату.

Изменение размеров элементарного объема выражается в том, что длины ребер dx , dy , dz изменяются соответственно на величины Δdx , Δdy , Δdz (см.Рисунок 3.2), которые называются абсолютными линейными деформациями и положительны при увеличении размеров. В уравнениях удобнее использовать

относительные линейные деформации ε_x , ε_y , ε_z , которые получаются делением соответствующей абсолютной деформации на первоначальный размер.

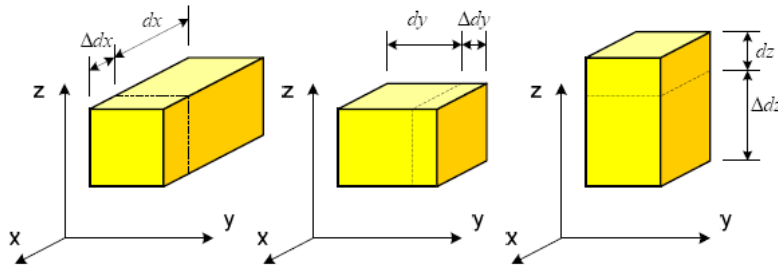


Рисунок 3.2 – Изменение длин длины ребер

Изменение формы элементарного объема $dV=dx \cdot dy \cdot dz$ (см.Рисунок 3.3) сводится к тому, что его ребра скашиваются, не приводя при этом к изменению объема. Изменение формы описывается тремя переменными γ_{xy} , γ_{yz} , γ_{zx} , которые показывают, насколько при деформировании изменяются прямые углы между гранями объема. Они называются угловыми деформациями или сдвигами.

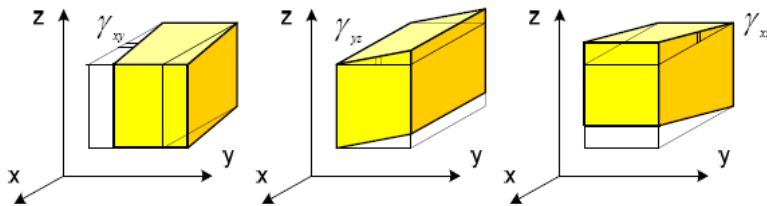


Рисунок 3.3 – Изменение объема

Деформации элементарного объема полностью описываются физической величиной, которая называется тензором деформаций и в декартовой системе координат обычно задается квадратной матрицей, компонентами которой служат перечисленные выше линейные и сдвиговые деформации. Матрица тензора деформаций (см.Формула (3.3)) является симметричной, поскольку $\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$, $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$, $\gamma_{zx} = \gamma_{xz}$.

$$T_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \cdot \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \cdot \gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2} \cdot \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \cdot \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \cdot \gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Вследствие деформаций тела в материале конструкции возникают внутренние, распределенные по объему силы, которые называются напряжениями, и фактически представляют собой давление, которое элементарный объем $dV=dx \cdot dy \cdot dz$ испытывает со стороны остального материала.

Рассмотрим напряжения, действующие на элементарный объем. Полные напряжения p_x , p_y , p_z , действующие на грани объема dV можно разбить на компоненты по координатным осям, обозначив символом σ напряжения, перпендикулярные к граням (нормальные напряжения), и символом τ - напряжения, лежащие в плоскости грани (касательные напряжения) (Рисунок 3.4). Первый индекс у всех напряжений показывает, вдоль какой оси направлена нормаль к той площадке, в которой действует напряжение. Вторым индексом у касательных напряжений показывает направление самого вектора.

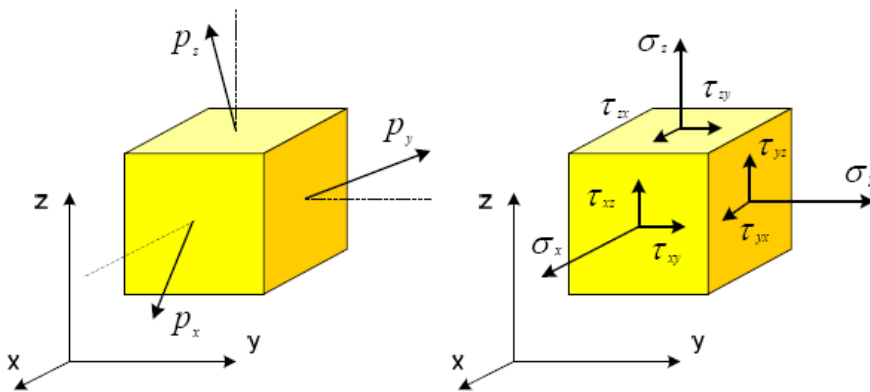


Рисунок 3.4 - Напряжения, действующие на элементарный объем

Напряженное состояние в точке тела полностью описывается физической величиной, которая называется тензором напряжений (см. Формула (3.4)). Тензор напряжений в декартовой системе координат обычно задается квадратной матрицей, компонентами которой служат перечисленные выше нормальные и касательные напряжения. Матрица тензора напряжений является симметричной, поскольку в соответствии с законом парности касательных напряжений $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{zx} = \tau_{xz}$.

$$T_{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Таким образом видно, что теория упругости и пластичности оперирует с 15 функциями (см. Таблица 3.1), каждая из которых, в общем случае, зависит от трех координат.

Таблица 3.1 – 15 функций для теория упругости и пластичности

Смещения	Деформации		Напряжения	
	линейные	угловые	нормальные	касательные
u, v, w	$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Теория упругости и пластичности располагает тремя группами уравнений: геометрическими, физическими (уравнения состояния) и статическими (уравнения равновесия) соотношениями.

Полная система уравнений теории упругости и пластичности содержит, в частности, геометрические соотношения, позволяющие по известным функциям смещений $u=u(x, y, z)$, $v=v(x, y, z)$, $w=w(x, y, z)$ определить компоненты тензора деформаций, и физические соотношения, позволяющие по известным компонентам тензора деформаций определить компоненты тензора напряжений. Шесть геометрических соотношений, связывающих смещения с деформациями, известны как соотношения Коши [35] (см. Формула (3.5)):

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_y - \nu \cdot \sigma_z), \gamma_{xy} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \tau_{xy} \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_z - \nu \cdot \sigma_x), \gamma_{yz} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \tau_{yz} \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_y), \gamma_{zx} = \frac{2 \cdot (1 + \nu)}{E} \cdot \tau_{zx} \end{cases} \quad (3.5)$$

В формуле (3.5) E - продольный модуль упругости материала (модуль Юнга), а ν - коэффициент Пуассона.

При матричной формулировке уравнений теории упругости принято информацию о смещениях точек тела, а также о деформированном и напряженном состоянии, учитывая симметрию соответствующих тензоров, представлять векторами (см. Формула (3.6)):

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}, \quad \{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}, \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.6)$$

В этом случае, введя матричный дифференциальный оператор $[L]$ (см.Формула (3.8)), соотношения Коши можно записать в матричной форме следующим образом (см.Формула (3.7)):

$$\{\varepsilon\} = [L] \cdot \{u\} \quad (3.7)$$

$$[L] = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial z & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial x \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Самым трудоемким при решении этапом является составление и решение системы уравнений, количество которых зависит от формы и количества конечных элементов, на которые разбита расчетная область, и может превышать 100000. Так, при решении прочностной задачи с применением четыре узловых прямоугольных элементов необходимо решить 8 уравнений для нахождения смещений узловых точек каждого элемента, и, несмотря на то, что смежные элементы имеют общие узлы, размерность результирующей системы получается значительной. Такая ситуация заставляет исследователей отходить от собственных программных разработок и обращаться к специализированным программным комплексам, реализующим МКЭ. В настоящее время наиболее известными программными комплексами являются: "ANSYS" (фирма "ANSYS, Inc.", США), "Cosmos Works" ("Dassault Systèmes SolidWorksCorp.", США), "NASTRAN" ("MSC.Software Corporation", США), "APM WinMachine" (НТЦ "АПМ", Россия), "Зенит" (МГНПП "ДИП", Россия), "LS-DYNA" ("Livermore Software TechnologyCorp.", США), "COMSOL" ("COMSOL Group", Швеция), PAM-STAMP 2G (фирма ESI Group, Франция) и др.

3.2. Описание метода конечных элементов в реализации программного комплекса PAM-STAMP 2G

Для верификации результатов предлагаемой модели поведения металла при формообразовании подсечки подвижными прижимами выбран программный комплекс PAM-STAMP 2G.

Система PAM-STAMP 2G французской компании ESI Group (Engineering Systems International) - специализированный продукт, являющийся составной частью группы пакетов моделирования сложных динамических процессов, объединенных под обобщенным названием PAM-SYSTEM и предназначенный для моделирования процессов обработки металлов давлением. Аббревиатура PAM означает Programs for Applied Mechanics (программы для прикладной механики).

PAM-STAMP 2G (2G означает 2-nd Generation, то есть 2-е поколение программы) представляет собой интегрированный пакет подготовки производства штампованных деталей. PAM-STAMP 2G позволяет на основе данных CAD модели перехода штамповки, описания характеристики штампуемого материала, параметров процесса штамповки и его кинематики, путем анализа результатов расчета оптимизировать:

- форму штамповой оснастки;
- размер и форму исходной заготовки;
- технологический процесс изготовления;
- условия трения и характеристики применяемой технологической смазки;
- вид, геометрические параметры и расположение тормозных элементов;
- расположение линии обрезки и т.д.

PAM-STAMP 2G обладает возможностью подключения дополнительных модулей для расширения физико-математических моделей представления материалов в системе. С целью повышения точности расчета и снижения времени его выполнения в системе PAM-STAMP 2G применен оригинальный аппарат так называемой “Адаптивной сетки” (Adaptive Mesh), значительно упрощающий

создание конечно-элементной модели деформируемого листа и позволяющий на основе ряда критериев в процессе расчета в автоматическом режиме менять размер элементов сетки в зависимости от формы инструмента и стадии процесса. В RAM-STAMP 2G предусмотрена возможность получения точных цифровых данных о поэлементном распределении толщины материала, возникающих напряжениях и деформациях и целой гаммы дополнительных параметров, дающих полную картину процесса формообразования. Таким образом при использовании RAM-STAMP 2G, при разработке технологии изготовления и конструкции оснастки пользователь получает уникальную возможность полностью моделировать процесс штамповки детали на своеобразном “электронном прессе”, выявив ошибки проектирования оснастки до ее дорогостоящего изготовления, тем самым, значительно ускорить процесс наладки оснастки и существенно снизить затраты на ее переделку.

Для того более точной верификации опишем используемые в RAM-STAMP 2G данные для моделирования процесса формообразования. Во-первых, использовались конечные элементы Belytschko-Lin-Tsay shell в постановке полного интегрирования. Элемент оболочки Belytschko-Lin-Tsay [72, 69] является одним из самых быстрых элементов для моделирования тонких оболочек. Это, вместе с его надежностью, является причиной того, что он популярен в кодах конечных элементов. Реализация текущей математики с использованием толщины основывается на формулировке оболочки Belytschko-Lin-Tsay с релаксацией переменной толщины. Это гарантирует, что элемент будет эффективным и, обладать свойствами, полезными для приложений, где важна деформация по толщине.

Кинематику, т. е. положение и скорость оболочки с растяжением по толщине, можно записать в локальных координатах как (см. Формулы (3.9), (3.10) [82, 90]

$$x_i = (x_{iI} + s_I \cdot \delta_{i3}) \cdot N_I \cdot (\xi_1 \cdot \xi_2) \quad (3.9)$$

$$v_i = (v_{iI} + s_I \cdot e_{ij3} \cdot \omega_{jI} + \dot{s}_I \cdot \delta_{i3}) \cdot N_I \cdot (\xi_1 \cdot \xi_2) \quad (3.10)$$

$$\text{где } s_I = \frac{\xi_3}{2} \cdot t_I + (1 - \xi_3) \cdot q_I$$

Кинематика основана на оболочке Belytschko-Lin-Tsay с дополнительным признаком, что толщина является переменной. Переменная толщины представлена t_I и дополнительной переменной деформации q_I , чтобы обеспечить линейную деформацию по толщине. Другие переменные и параметры:

- x_{iI} – i -ый компонент координаты узла I
- v_{iI} – i -ый компонент поступательной скорости узла I
- ω_{jI} – j -ый компонент вращательной скорости узла I
- e_{ij3} – тензор перемещения
- N_I – функция формы, локализованная в узле I
- δ_{i3} – Дельта Кронекера [40]
- ξ_i – i -ый компонент родительской координаты от -1 до 1

В качестве поверхности текучести материала была использована феноменологическая (основанная на классической теории пластичности) модель Hill 48 [89]. Модель базируется на предположениях что:

- среда однородна на макроскопическом уровне;
- условие текучести зависит от тензоров напряжений, деформаций, и, возможно, скоростей деформаций;
- пластическое течение несжимаемо (что подтверждено экспериментально для большого числа изотропных и анизотропных металлов);
- поверхность текучести не зависит от гидростатического напряжения [35].

Главные предположения модели Hill 48 пластичности базируются на феномене поверхности текучести (разделяющей зоны упругости и упругопластичности в пространстве напряжений), пластического потенциала (градиент пластического потенциала описывает направление скоростей пластических деформаций), соотношений упрочнения и предположения о несжимаемости материала при пластическом течении [27]. Поверхность текучести описывается выпуклой функцией в пространстве напряжений, что является следствием постулата максимума диссипации энергии [83].

Опишем математику, используемую этой моделью. Для гидростатического напряжения имеем формулу (3.11):

$$\tilde{P} = p^* \cdot a_{ij} \quad (3.11)$$

где p^* - величина обобщенного напряжения;

a_{ij} - обобщенный символ Кронекера;

Теперь воспользуемся тем фактом, что девиатор напряжений не должен зависеть от обобщенного гидростатического напряжения (см.Формула (3.12):

$$\tilde{P} \cdot \tilde{S} = 0, \quad a_{ij} \cdot \tilde{S}_{ij} = 0, \quad \sigma_{ij} = p^* \cdot a_{ij} + \tilde{S}_{ij} \quad (3.12)$$

где \tilde{S}_{ij} - компоненты обобщенного девиатора напряжений (см.Формула (3.13);

$$\tilde{S}_{ij} = \sigma_{ij} - p^* \cdot a_{ij} \quad (3.13)$$

Условие нормальности и соотношение, позволяют выписать выражение для обобщенного давления (см.Формула (3.14):

$$p^* = \frac{\sigma_{ij} \cdot a_{ij}}{a_{ij} \cdot a_{ij}} = \frac{1}{\|a\|} \cdot \sigma_{ij} \cdot a_{ij} \quad (3.14)$$

где $\|a\| = a_{ij} \cdot a_{ij}$;

Тогда обобщенной девиатор часть тензора напряжения имеет вид (см.Формула (3.15):

$$\tilde{S}_{ij} = \sigma_{ij} - a_{ij} \cdot \frac{1}{\|a\|} \cdot \sigma_{ij} \cdot a_{ij} \quad (3.15)$$

Рассмотрим объемное деформированное состояние, описываемое тензором деформаций $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{3} \cdot \varepsilon \cdot \delta_{ij}$. Вектор давления вектор определяется выражением (см.Формула (3.16):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon \cdot \delta_{11} \\ \varepsilon \cdot \delta_{22} \\ \varepsilon \cdot \delta_{33} \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{3} \cdot \varepsilon \cdot \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} + C_{13} \\ C_{12} + C_{22} + C_{23} \\ C_{13} + C_{23} + C_{33} \end{bmatrix} = K_c \cdot \varepsilon \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{22} \\ a_{33} \end{bmatrix}, p = K_c \cdot \varepsilon \end{aligned} \quad (3.16)$$

где C_{ij} - элементы матрицы жесткости;

p - обобщенное напряжение в случае чистых объемных деформаций;

K_C - обобщенный объемный модуль сжатия (растяжения);

Чтобы сохранить возможность упрощения к классическому изотропному случаю, компоненты тензора a_{ij} и параметр K_C определяем следующим образом (см.Формула (3.17):

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$\text{где } a_{11} = (C_{11} + C_{12} + C_{13}) \cdot 3 \cdot \bar{K}_C;$$

$$a_{22} = (C_{12} + C_{22} + C_{23}) \cdot 3 \cdot \bar{K}_C;$$

$$a_{33} = (C_{13} + C_{23} + C_{33}) \cdot 3 \cdot \bar{K}_C;$$

$$\bar{K}_C = \left(\sqrt{3 \cdot \begin{bmatrix} (C_{11} + C_{12} + C_{13})^2 \\ + (C_{12} + C_{22} + C_{23})^2 + \\ (C_{13} + C_{23} + C_{33})^2 \end{bmatrix}} \right)^{-1};$$

Тензор a_{ij} должен переходить в символ Кронекера в случае изотропного тела, поэтому его норма берется равной 3. Параметры a_{ij} , K_C описывают фундаментальные свойства анизотропного материала. В случае изотропного тела тензор a_{ij} имеет следующие значения $a_{11} = a_{22} = a_{33} = 1$, и поэтому для классического случая соотношение $(p^* = \frac{\sigma_{ij} \cdot a_{ij}}{a_{ij} \cdot a_{ij}} = \frac{1}{\|a\|} \cdot \sigma_{ij} \cdot a_{ij})$ принимает привычную форму (см.Формула (3.18):

$$p^* = \frac{1}{3} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.18)$$

Обобщенный модуль объемного сжатия K_C также принимает классический вид (см.Формула (3.19):

$$K_C = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (3.19)$$

Пусть условие текучести не зависит от гидростатического напряжения. Рассмотрим напряженное состояние, описываемое тензором напряжений $\sigma_{ij} = p^* \cdot a_{ij}$ (см.Формула (3.20):

$$\hat{F}(\sigma_{ij}) = p^* \cdot \hat{F}(a_{ij}) = Y, \quad p^* = \frac{Y}{\hat{F}(a_{ij})}, \quad (3.20)$$

где функция $\hat{F}()$ описывает поверхность текучести,

Y — предел текучести.

Заметим, что величина $\hat{F}(a_{ij})$ отлична от нуля и имеет положительное значение. Поэтому параметр p^* имеет конечное значение, и напряженное состояние, соответствующие тензору напряжения $\sigma_{ij} = p^* \cdot a_{ij}$, может быть физически реализовано. У сильно анизотропных материалов величина критического напряжения p^* уменьшается с ростом значения $\hat{F}(a_{ij})$. Таким образом, построено напряженное состояние, соответствующие упругим объемным деформациям (в силу несжимаемости пластического течения), с одной стороны, и удовлетворяющие условию пластичности, с другой стороны.

В качестве функции для описания поведения материала в пластической зоне использовалась функция «Krupkowsky law» [88]. Подробное описание приводилось в главе 2 (см. Формула (2.34)).

В качестве одной из нагрузки используется давления по закону Паскаля [96] относительно объекта на который накладывается. Давление применяется с использованием нормальных векторов элементов. Поэтому ориентация нормальных векторов должна быть непрерывной и сонаправленной по элементам. Положительное значение давления применяется в противоположном направлении от нормальных векторов.

В качестве следующей нагрузки используется давление «Жидкой ячейки» (см. Рисунок 3.5). Это давление представляет собой удобный для вычисления способ моделирования объема жидкости, для деформации детали без необходимости дискретизации жидкой области, используя наращивание давления посредством нагнетания движения жидкости или перемещения всего объема жидкости. При этом для контроля жидкости задавались ряд параметров:

- сдвиговой модуль жидкости для установки необходимой жесткости жидкости;
- объем жидкости. Объем ячейки рассчитывается из объемов между поверхностями элементов и проекцией поверхностей элементов на плоскость, заданную осью для вычисления объема.

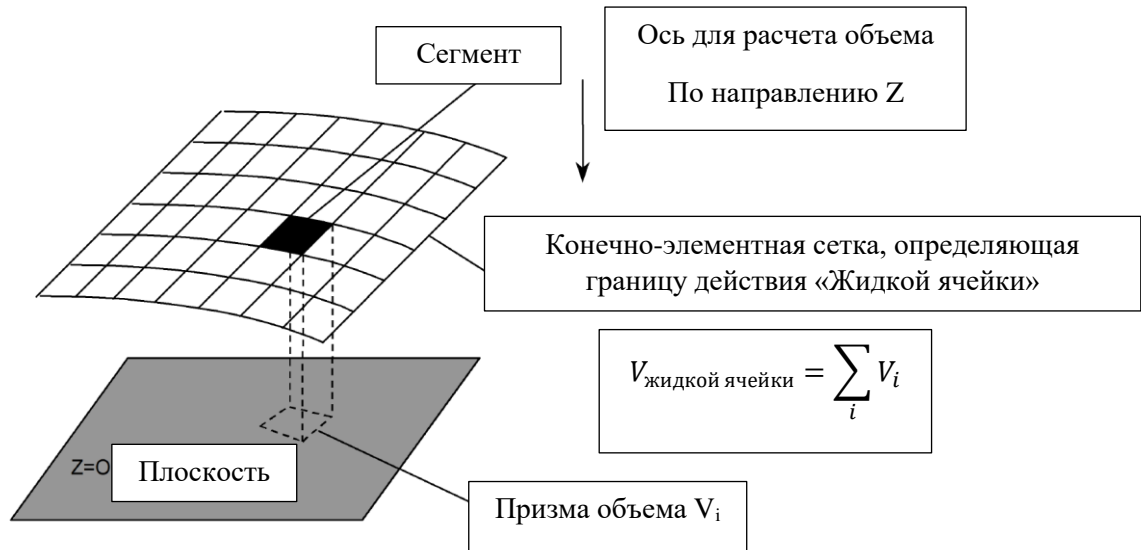


Рисунок 3.5 - Давление «Жидкой ячейки»

Изменение внутреннего объема во время формообразования и определение заданной скорости потока создает нагрузку давлением, приложенным к элементам, образующим жидкую ячейку. В качестве параметра, контролирующего изменение внутреннего объема принята средняя скорость свободной части заготовки V_{av} (см.Рисунок 3.6). Давление рассчитывается таким образом, чтобы средняя скорость свободной заготовки (V_{av}) соответствовала заданному пользователем целевому значению V_{imp} для опции жидкой ячейки:

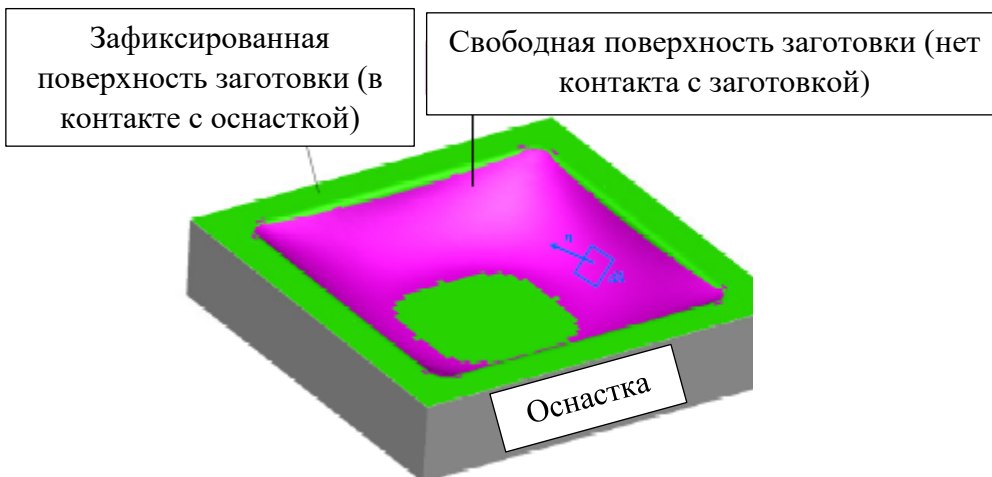


Рисунок 3.6 – Определение зон свободной части заготовки

Средняя нормальная скорость листа V_{av} представляет собой среднюю скорость, взвешенную коэффициентом, зависящим от ширины распределения

скорости и коэффициента отклонения входного параметра (SIGV)(см.Формула (3.21):

$$V_{av} = \bar{V} \cdot \left[1 + \left(\frac{SIGV \cdot \sigma_y}{V_{imp}} \right) \right] \quad (3.21)$$

где \bar{V} - средняя нормальная скорость элементов $\bar{V} = \frac{\int_{free} V \cdot n \cdot dA}{A_{free}}$;

σ_y – дисперсия нормальной скорости элементов ;

$$\sigma_y = \frac{\int_{free} (V \cdot n - \bar{V}) \cdot dA}{A_{free}};$$

A_{free} - свободная площадь заготовки $A_{free} = \int_{free} dA$ (см.Рисунок 3.6);

SIGV - дополнительный параметр обеспечивающий дополнительное управление пиковой скоростью, когда распределение скорости листа происходит по большой площади, что может иметь место в промышленных случаях;

Узлы заготовки классифицируются как «свободные» или «ограниченные» в контактных процедурах в зависимости от их близости к поверхностям оснастки (см.Рисунок 3.7).

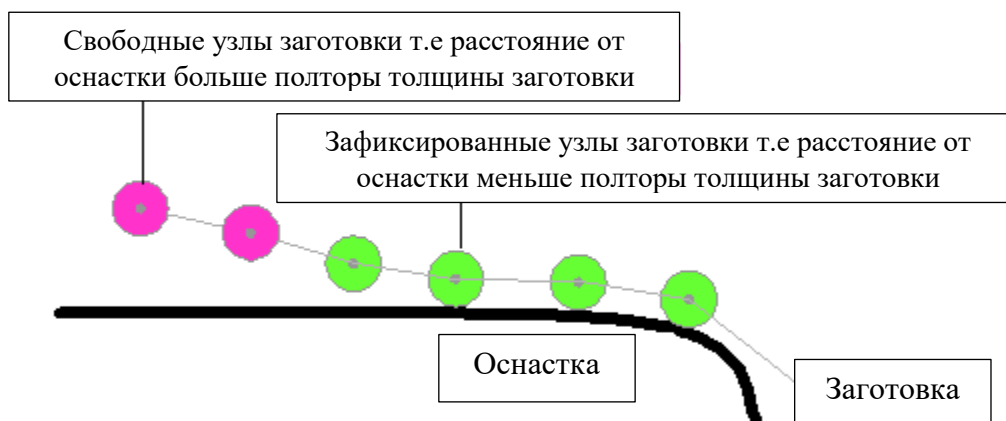


Рисунок 3.7 – Свободные и зафиксированные узлы

В качестве критерия остановки расчета принят коэффициент контакта. Расчет формообразования автоматически прекращается при достижении доли площади заготовки в контакте с оснасткой превышают установленный пользователем предел (коэффициент контакта- contact ratio)(см.Формула (3.22):

$$\text{contact ratio} = \frac{A_3 - A_{free}}{A_3} \quad (3.22)$$

где A_3 - площадь заготовки;

Для решения контактной задачи использовался точный контакт (Accurate Contact). Этот контакт постоянно запрещает узлам заготовки проникать в объем элемента оснастки во время вычисления. Узлы удерживаются точно на поверхности оснастки благодаря точно рассчитанным контактным усилиям. Элементы не могут перемещаться на другую сторону оснастки. Узел рассматривается как шар с диаметром, равным среднему значению толщины элементов, к которым он принадлежит.

На все тела кроме заготовки назначены условия абсолютно жесткого тела [13]. Жесткое тело представляет собой набор элементов, в которых не возникают напряжения и как следствия деформации. Движение таких тел может быть описано посредством шести степеней свободы центра тяжести: три перемещения и три вращения.

3.3. Моделирования формообразования детали №2

Для детали №2 была спроектирована оснастка, подштамповая плита и подвижный прижим по результатам аналитического расчета (см.Глава 2, раздел 2.3)(см.Рисунок 3.8).

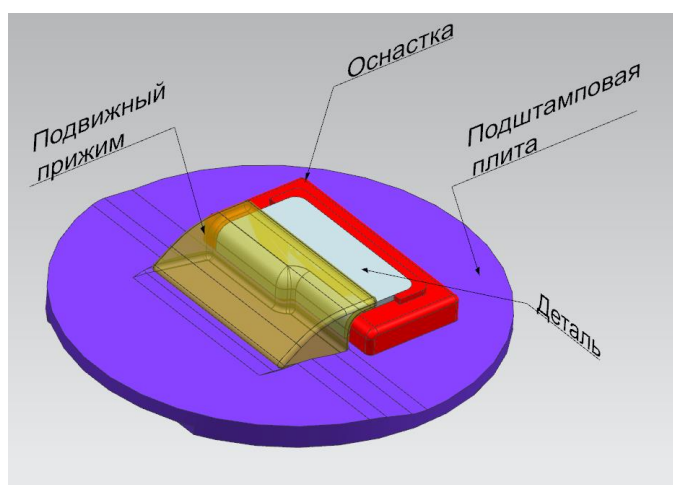


Рисунок 3.8 – Геометрия комплекса оснастки для детали №2

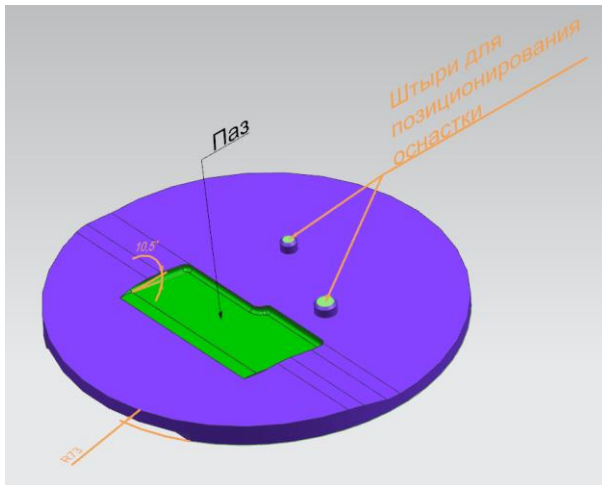


Рисунок 3.9 – Геометрическая модель подштамповой плиты

Подштамповая плита сделана для сохранения направления движения прижима за счет паза. Паз сделан под углом $10,5^\circ$ для исключения заклинивания подвижного прижима во время формообразования (см.Рисунок 3.9). Также в подштамповой плите выполнены два штыря для позиционирования оснастки и предотвращения ее движения во время формообразования (см.Рисунок 3.9).

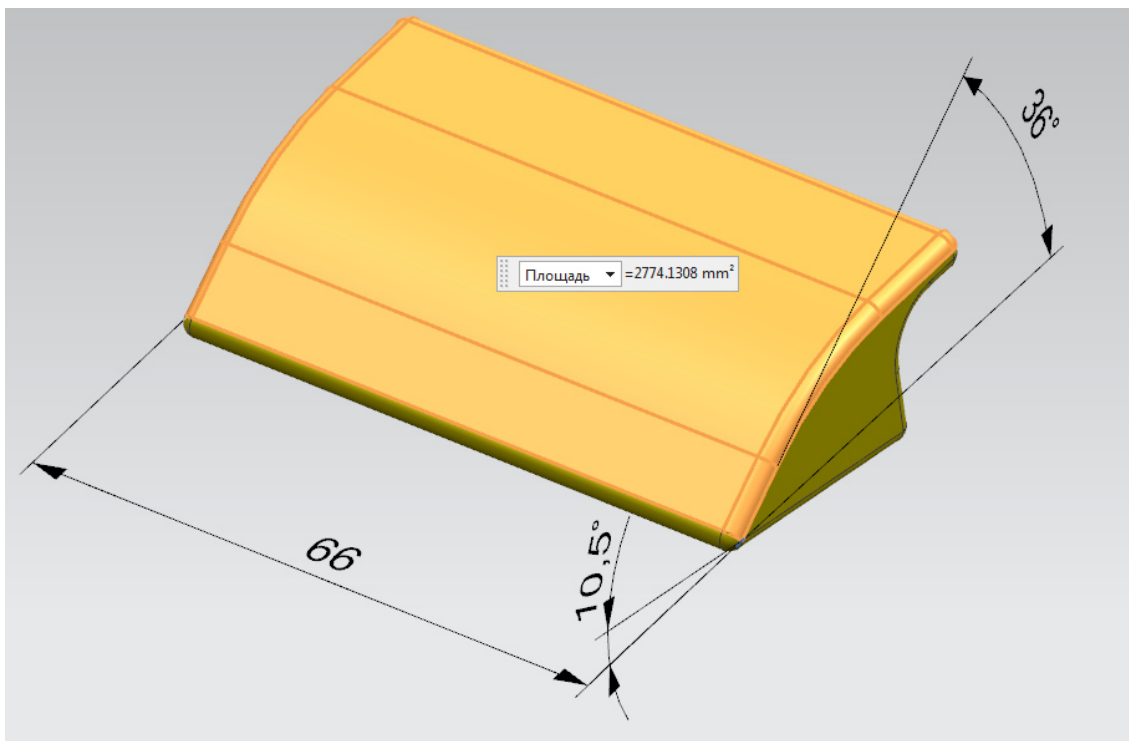


Рисунок 3.10 – Геометрическая модель подвижного прижима

Подвижный прижим выполнен с контактной площадью с эластичной средой больше чем по расчету $S_{гер} = 2653,948 \text{ мм.}^2$ (см.Глава 2, Формула (2.63) на 4,5 % (2774,131 мм.²) ввиду использования технологических радиусов исключая повреждение эластичной среды и выглаживания функции для использования в САД системе (см.Рисунок 3.10).

Используя производную функции профиля были найдены диапазоны изменения угла наклона прямолинейной части профиля и, они составили от $35,905^\circ$ до $36,302^\circ$ (см.Глава 2, Рисунок 2.21). Выбрано целое значение 36° (см.Рисунок 3.10). Габаритный размер увеличен относительно пределов интегрирования на величину радиусов до 66 мм. (см.Глава 2, раздел 2.3, $V=D=66 \text{ мм.}$). Для исключения заклинивания подвижного прижима во время формообразования основание подвижного прижима выполнено под углом $10,5^\circ$ (также, как и в поштамповой плите) (см.Рисунок 3.10).

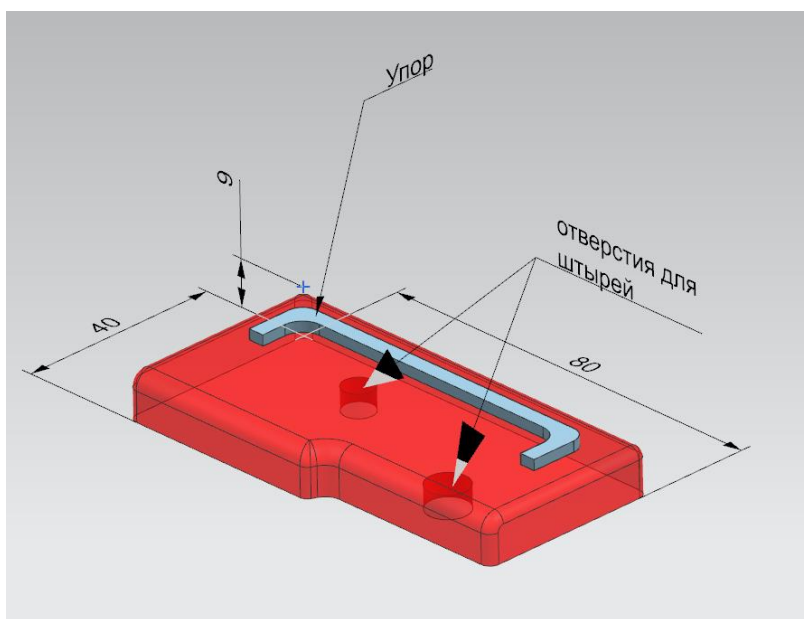


Рисунок 3.11 - Геометрическая модель оснастки

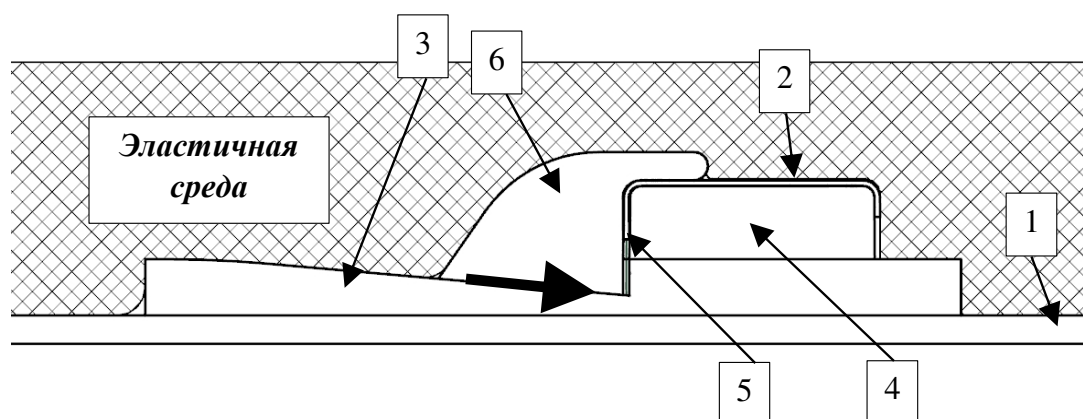
Оснастка имеет два отверстия для позиционирующих штырей и упор для позиционирования заготовки до начала формообразования (см.Рисунок 3.11).

Предлагаемая схема формообразования включает

– перед проведением формообразования на стол пресса устанавливается оснастка, закрепленная на подштамповой плите с пазом для установки подвижного элемента;

– на шпильки оснастки устанавливается заготовка, после чего проводится предварительное формообразование;

– на подштамповую плиту в пазы устанавливается подвижный прижим и выполняется окончательное формообразование, что обеспечивает качественное получение детали с подсечкой.



1 - стол пресса; 2 - позиционирующие штыри;

3 - подштамповая плита; 4 - оснастка для формообразования;

5 - заготовка в виде развертки; 6 - подвижный прижим;

Рисунок 3.12 – Формообразование с использованием подвижного прижима

Эластичная среда воздействует на наклонную поверхность прижима и приводит его в движение по наклонной поверхности паза в подштамповой плите. Перемещение подвижного прижима при окончательной формовке обеспечивает необходимое напряженно-деформированное состояние сжатия и достаточное силовое воздействие на деформируемую зону детали для исключения «недоштамповки» (см.Рисунок 3.12).

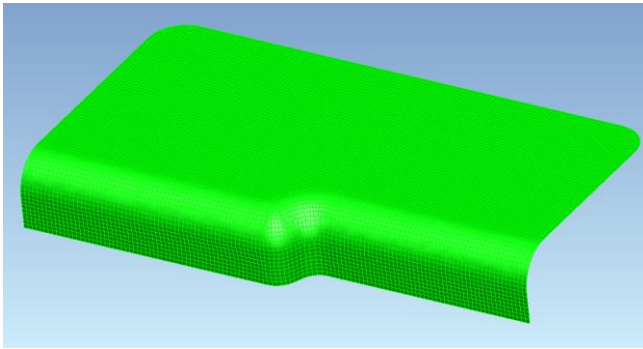
Использование прижима, перемещающегося по наклонной поверхности подштамповой плиты (см.Рисунок 3.12), создаёт условия всестороннего сжатия в деформируемой зоне детали с «подсечкой» (зоне появления дефекта

«недоштамповка»). Условие всестороннего сжатия в проблемной зоне является единственным способом устранения дефектов на нестандартных подсечках при формообразовании.

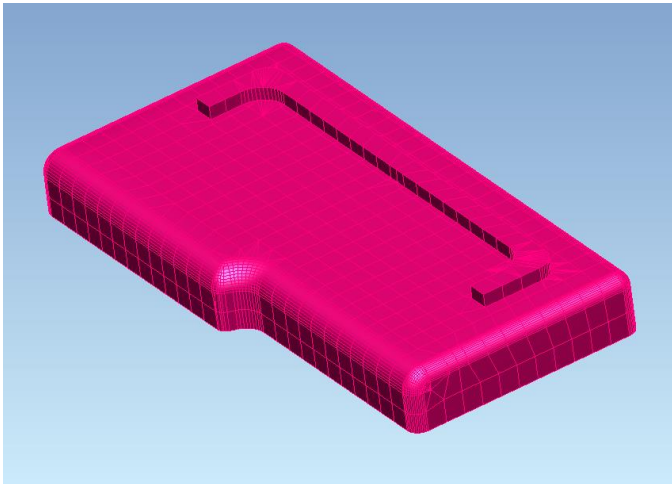
Для моделирования поведения материала в пластической зоне кривой течения для функции «Krupkowsky law» [88] заданы следующие параметры $K=324,17$ МПа, $n=0,2183$; $\varepsilon_0=0,0003$ соответствующие материалу Д16АМ. Заданы также:

- модуль Юнга – 68737 МПа;
- коэффициент Пуассона – 0,3318;
- плотность – 7,8 кг/мм³;

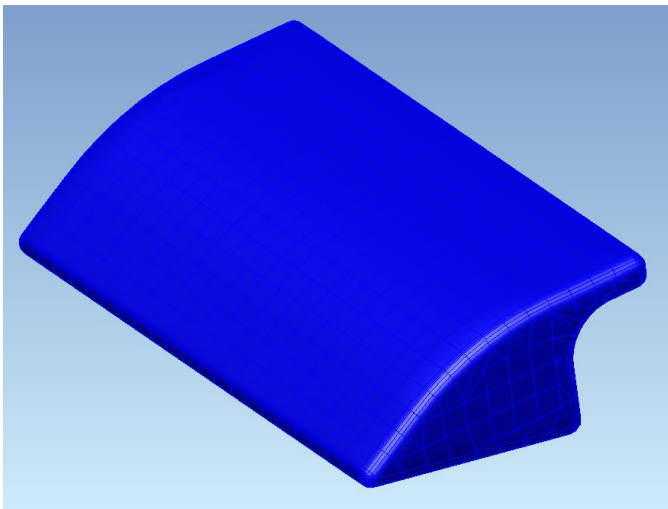
При построении математической модели геометрия конструкции представляется набором конечных элементов очень простой формы. Изменение перемещений и напряжений внутри одного элемента моделируется также очень простыми функциями, линейными или квадратичными [23]. При рассмотрении соединений конечных элементов действующие между ними напряжения представляются эквивалентными сосредоточенными силами (и иногда моментами), приложенными в точках соединения – узловых точках. Соответственно смещения этих точек – степени свободы используются для описания перемещений элемента. К узловым силам приводятся также внешние распределенные нагрузки, действующие на поверхности тела. Закрепление границ тела также сводится к закреплению узловых точек. Таким образом, расчетная модель становится дискретной. В качестве построителя сетки использовался встроенный в PAM-STAMP алгоритм дискретизации DeltaMESH. Так как заготовка деталь является листовой, она моделируется мембранными элементами с заданной половиной толщины в обе стороны, поэтому объёмная модель заменена на среднюю поверхность. Объёмные модели подвижного прижима и оснастки тоже заменены на оболочковые модели при построении конечно-элементной сетки (см.Рисунок 3.13).



а)



б)



в)

а) заготовка; б) оснастка; в) подвижный прижим

Рисунок 3.13 – Конечно-элементная сетка

Для расчета разверток использовался упрощенный метод обратного подхода (Inverse) используемый в PAM-STAMP [46] (см.Рисунок 3.14). Он заключается в

том, что деформации и история контактов учитываются только в начальном и конечном положении детали, без промежуточных состояний. В этом подходе учитываются свойства материала, но не учитывается полная история деформации и контактов, вносящих свои погрешности.

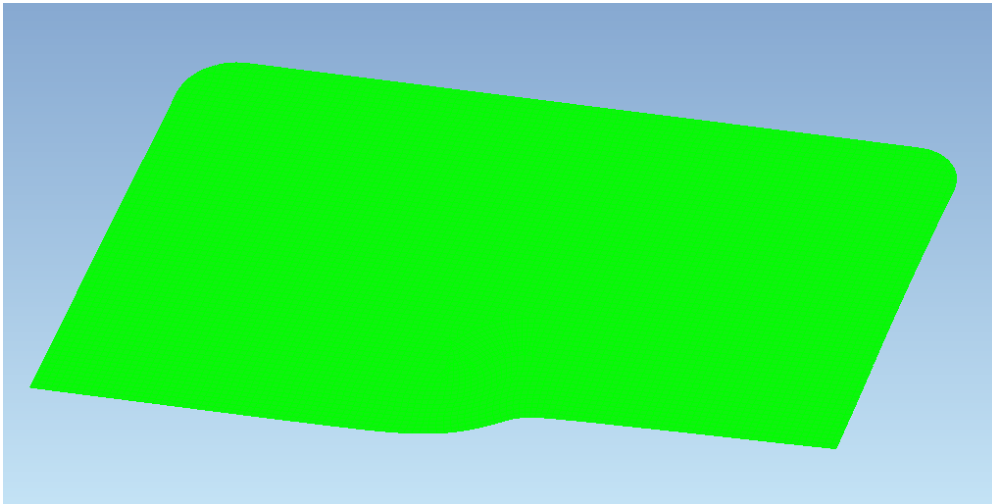


Рисунок 3.14 –Развертка детали №2

Формообразование проводится на первом переходе путем приложения нагрузки на заготовку от давления «Жидкой ячейки». Второй переход давление по закону Паскаля [96] прикладывается на поверхность контакта подвижного прижима и эластичной среды (график давления берется с первого перехода полученный в результате работы функции «Жидкой ячейки»)(см. Рисунок 3.15).

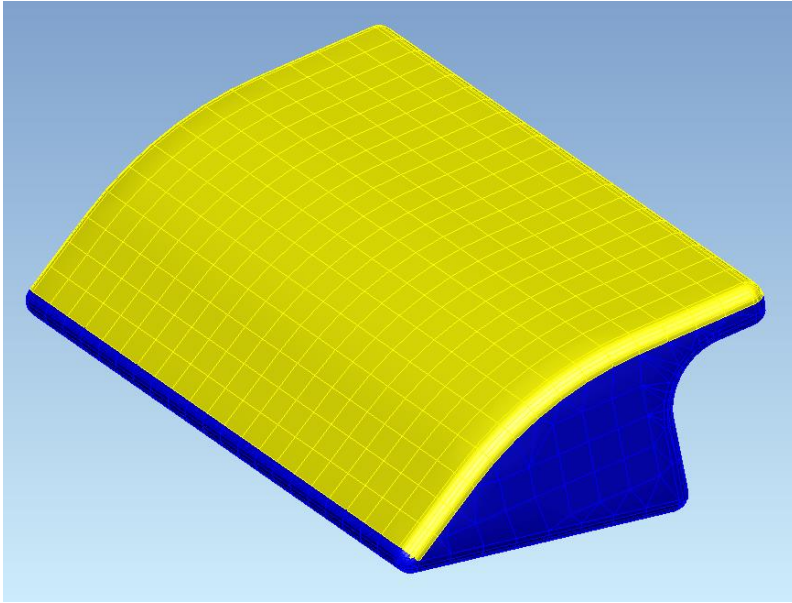
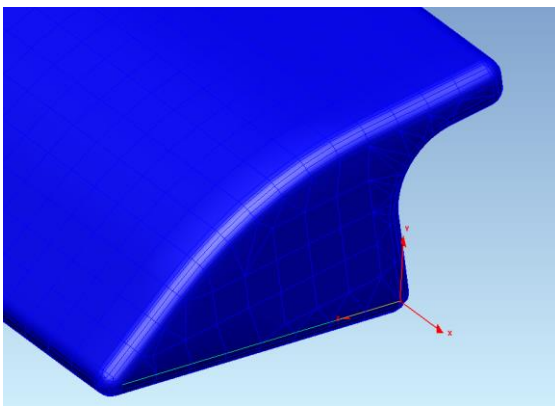
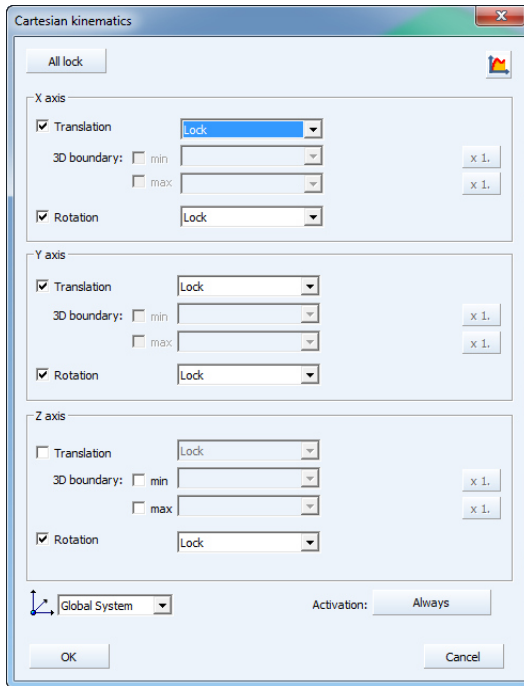


Рисунок 3.15 – Поверхность контакта подвижного прижима с эластичной средой

Подштамповая плита не участвует в расчете. Ее влияние, а точнее движение подвижного прижима задано граничными условиями в ограничениях движения во всех направлениях кроме оси Z системы координат, а также ограничены вращения во всех осях (см.Рисунок 3.16). На оснастку наложены ограничения полного исключения движения (запрет 3 движения и 3 вращений).



а)

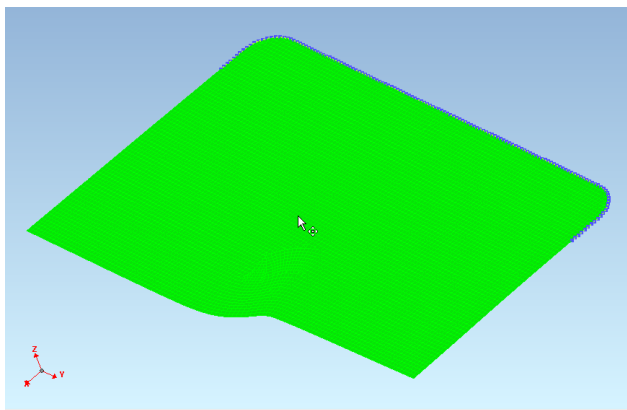


б)

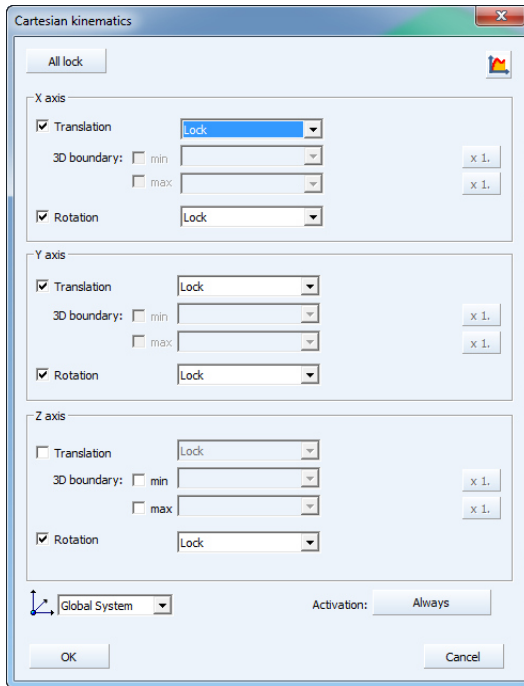
а) система координат для движения подвижного прижима; б) задание граничных условий в программе.

Рисунок 3.16 – Граничные условия подвижного прижима

На заготовку наложены ограничения движения в районе упора по всем осям кроме оси Z, а также ограничены вращения во всех осях (см. Рисунок 3.17).



а)



б)

а) ребра конечных элементов для задания граничных условий; б) задание граничных условий в программе.

Рисунок 3.17 – Граничные условия заготовки

В результате расчета были получены следующие результаты (результаты приведены для зона детали которую показывает Рисунок 3.18):

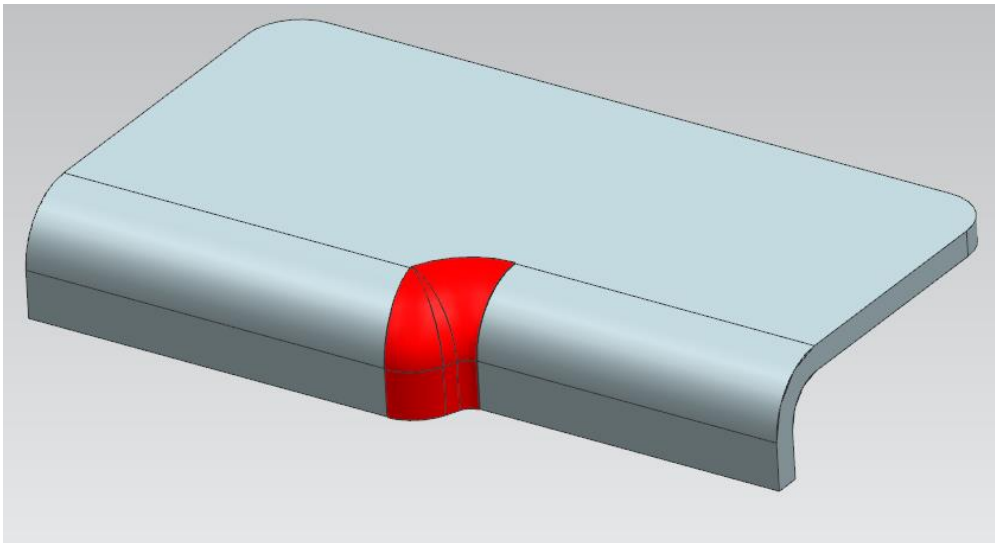


Рисунок 3.18 – Зона детали для которой показаны результаты моделирования

– график зависимости давления формообразования от времени при условии максимума давления в 30 МПа сгенерированный функцией «жидкая ячейка» (при заданных значениях $V_{imp} = 3 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$; contact ratio = 0,99; SIGV=4);

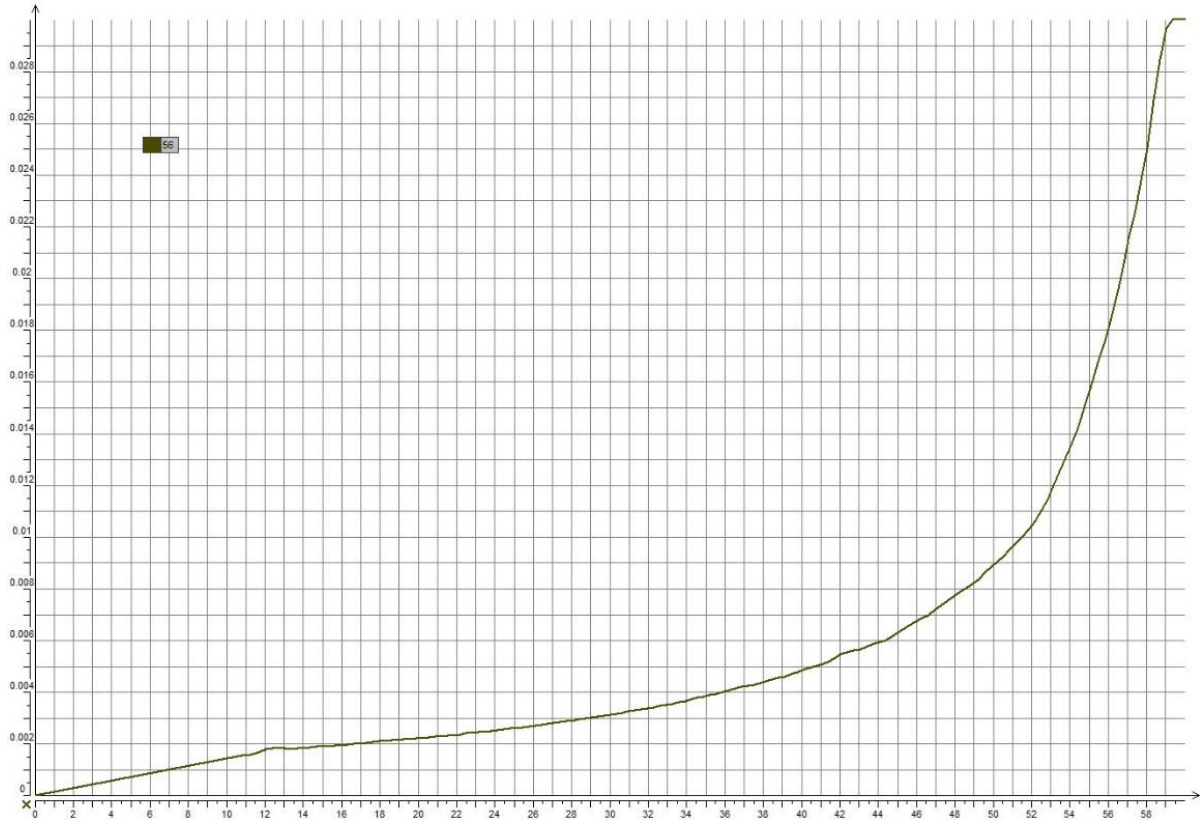


Рисунок 3.19 – График давления

– эквивалентные напряжения, считаемые по формуле энергетической теории прочности [63, 67](см.Формула (3.23):

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.23)$$

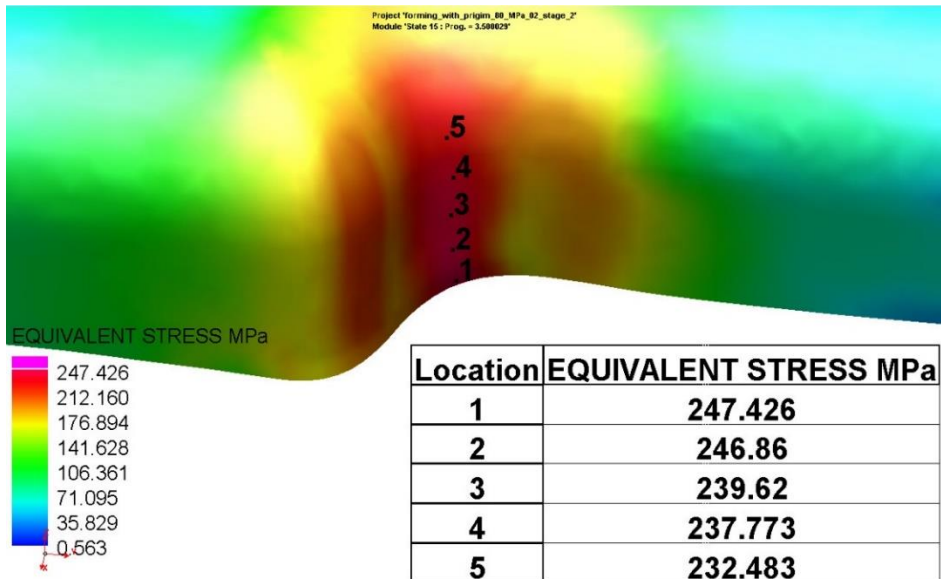


Рисунок 3.20 – Градиент распределения напряжений

Разница между $\sigma_{\text{под}} = 252,627 \text{ МПа}$ рассчитанной аналитически (см.Глава 2, см.Формула (2.35) и $\sigma_{\text{экв}} = 247,426$ (см. Рисунок 3.20) составляет 2,1% так что результаты можно считать идентичными;

– деформации общие. Считаемые из формулы длины вектор [9](см.Формула (3.24):

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2} \quad (3.24)$$

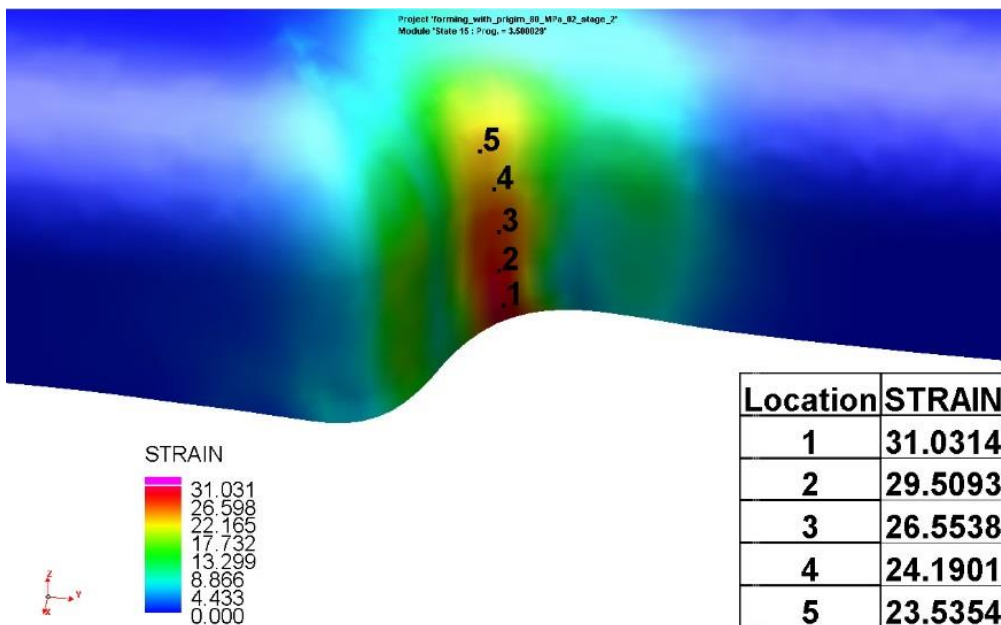


Рисунок 3.21 - Градиент распределения деформаций

Разница между $\varepsilon_{\text{пол}} = 31,8\%$ (см.Глава 2, см.Формула (2.33) рассчитанной аналитически и $\varepsilon = 31,3\%$ (см.Рисунок 3.21) составляет 2,4 % так что результаты можно считать идентичными;

– толщина.

Разница между $s_{i(\min)} = 1,678\text{мм}$. (см.Глава 2, см.Формула (2.29) рассчитанной аналитически и $s_{\text{мин}} = 1,696\text{мм}$. (см.Рисунок 3.22) составляет 1,1 процента так что результаты можно считать идентичными

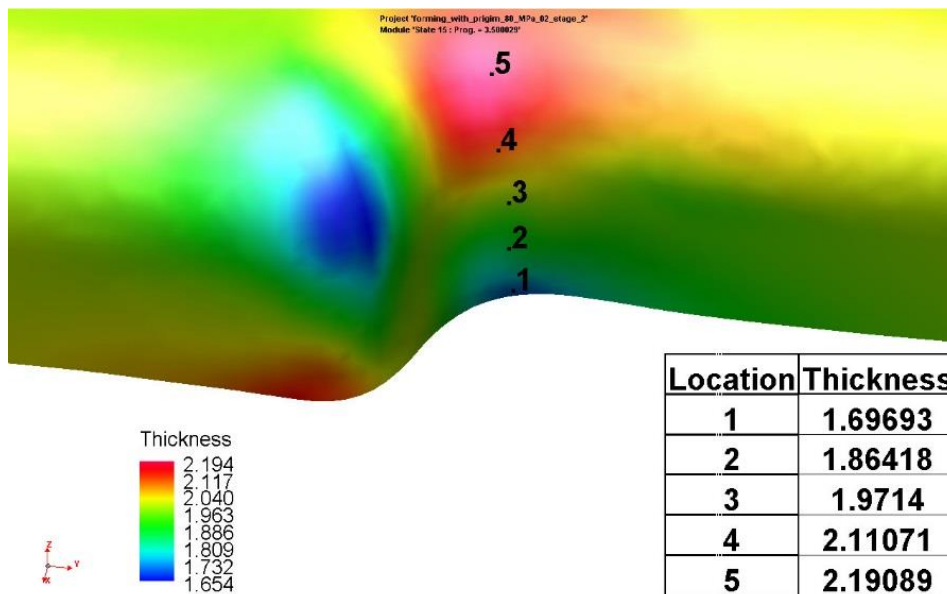


Рисунок 3.22 – Градиент распределения толщин

3.4. Моделирования формообразования детали №3

Для третьей детали была спроектирована оснастка, подштамповая плита и подвижный прижим по результатам аналитического расчета(см.Глава 2, раздел 2.4)(см.Рисунок 3.23).

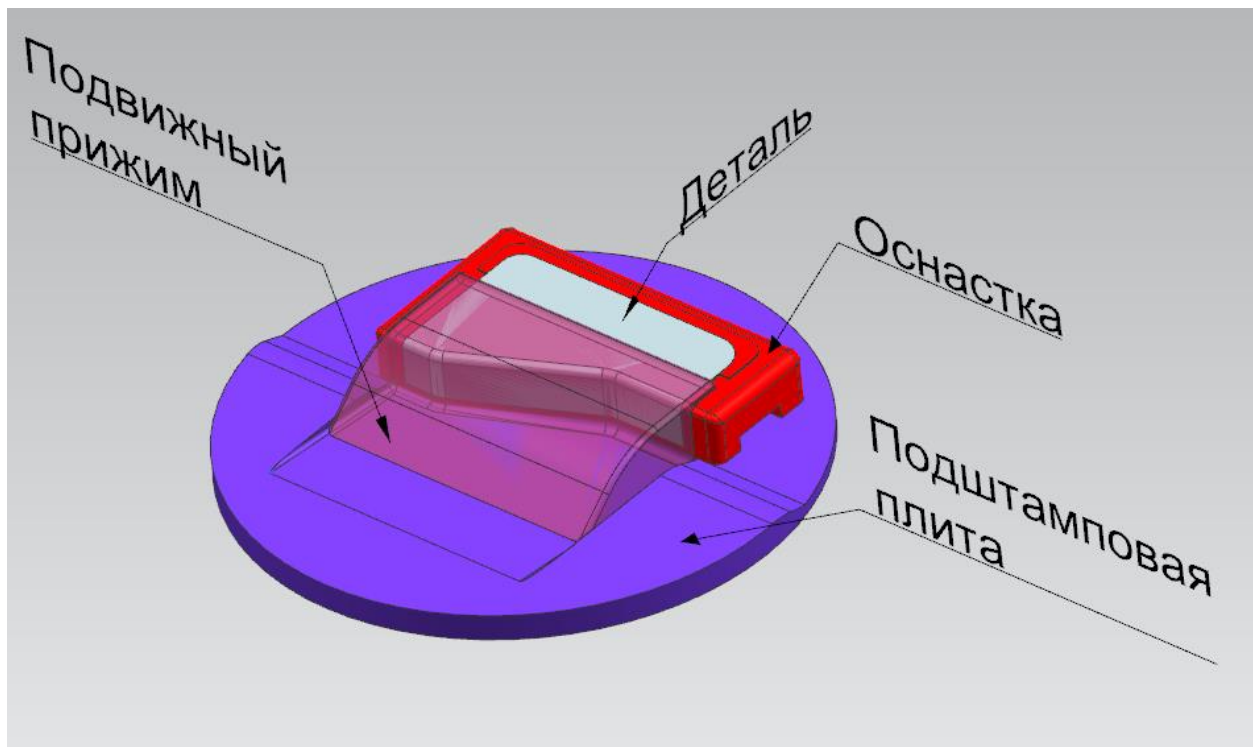


Рисунок 3.23 - Геометрия комплекса оснастки для детали №3

Подштамповая плита сделана для сохранения направления движения прижима за счет паза. Паз сделан под углом $5,4^\circ$ для исключения заклинивания подвижного прижима во время формообразования. Также в подштамповой плите выполнены два штыря для позиционирования оснастки и предотвращения ее движения во время формообразования (см.Рисунок 3.24).

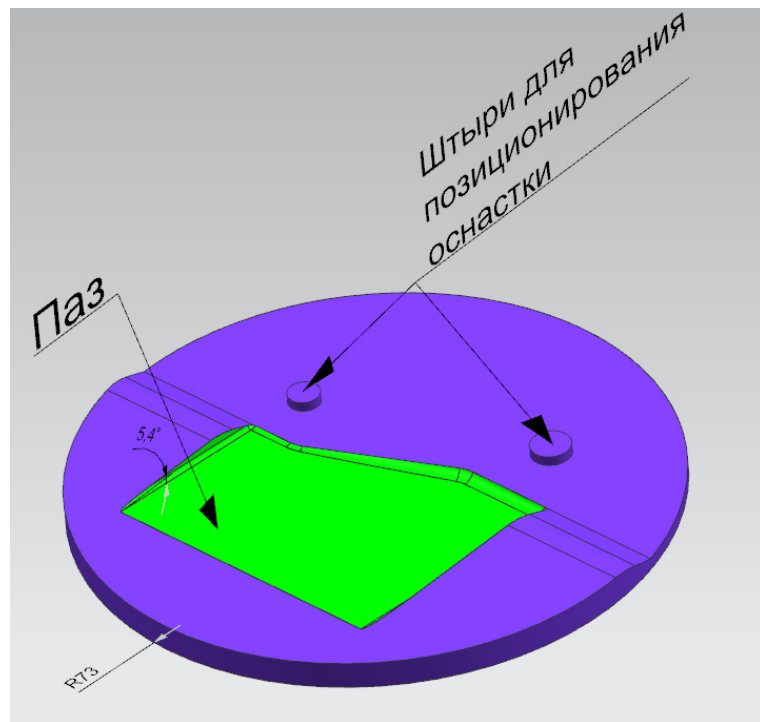


Рисунок 3.24 – Геометрическая модель подштамповой плиты

Подвижный прижим выполнен с контактной площадью с эластичной средой больше чем по расчету $S_{гер1} = 4094,510 \text{ мм.}^2$ (см.Глава 2, см.Формула (2.92) на 5,2 % (4318,648 мм.²)(см.Рисунок 3.25) ввиду использования технологических радиусов исключая повреждение эластичной среды и выглаживания функции для использования в CAD системе.

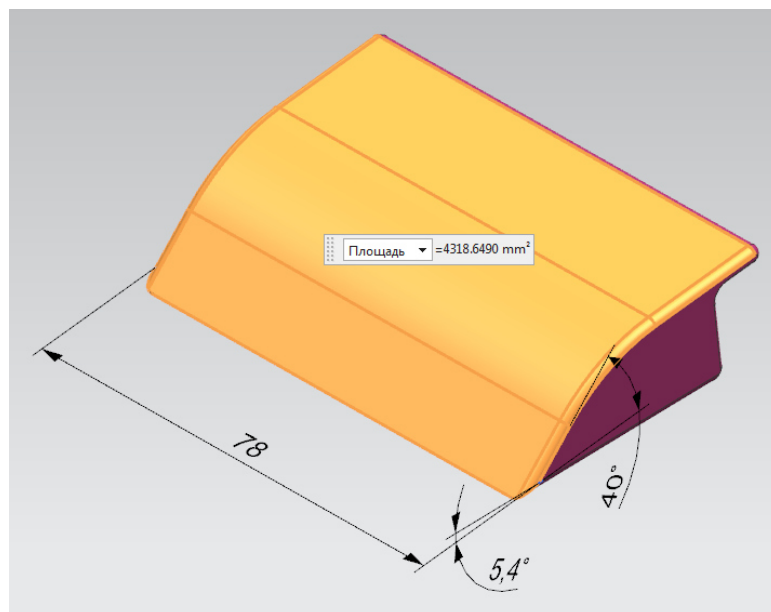
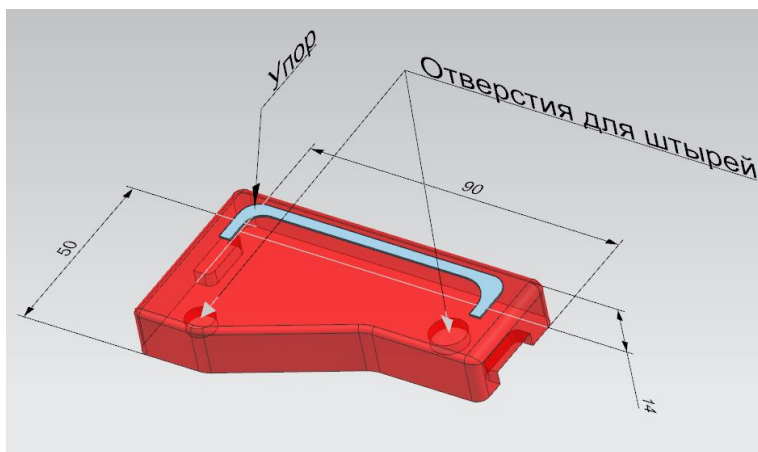
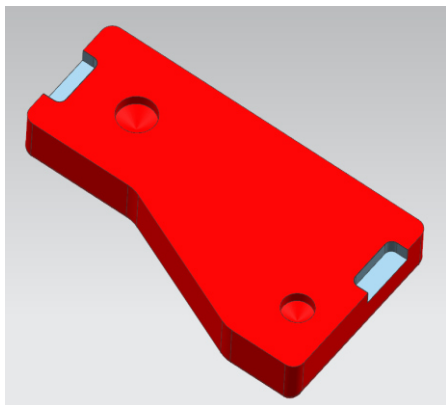


Рисунок 3.25 - Геометрическая модель подвижного прижима

Используя производную функции профиля были найдены диапазоны изменения угла наклона прямолинейной части профиля и, они составили от $38,058^\circ$ до $41,512^\circ$. Выбрано целое значение 40° . Габаритный размер увеличен относительно пределов интегрирования на величину радиусов до 78 мм. Для исключения заклинивания подвижного прижима во время формообразования основание подвижного прижима выполнено под углом $5,4^\circ$ (также, как и в поштамповой плите). Оснастка имеет два отверстия для позиционирующих штырей и упор для позиционирования заготовки до начала формообразования. Также имеются технологические пазы для снятия оснастки с подштамповой плиты (см.Рисунок 3.26).



а)



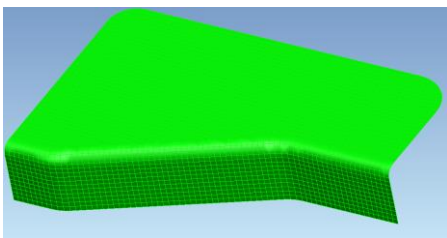
б)

Рисунок 3.26 - Геометрическая модель оснастки

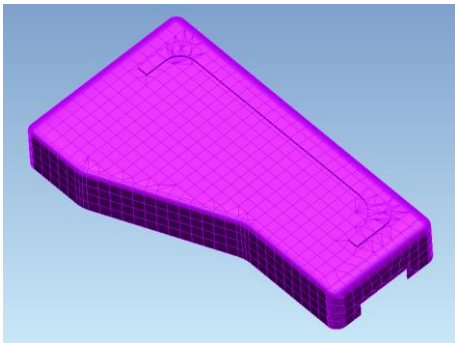
Предлагаемая схема формообразования та же что и в случае детали №2 (см. раздел 3.3).

Для моделирования поведения материала в пластической зоне кривой течения для функции «Krupkowsky law» заданы следующие параметры аналогичные детали №2 (см. раздел 3.3).

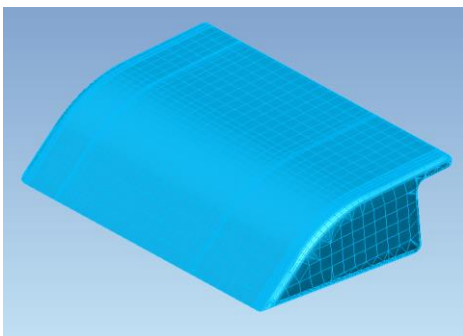
В качестве построителя сетки использовался встроенный в RAM-STAMP алгоритм дискретизации DeltaMESH. Так как заготовка деталь является листовой, она моделируется мембранными элементами с заданной половиной толщины в обе стороны, поэтому объёмная модель заменена на среднюю поверхность. Объёмные модели подвижного прижима и оснастки тоже заменены на оболочковые модели при построении конечно-элементной сетки (см.Рисунок 3.27).



а)



б)



в)

а) заготовка; б) оснастка; в) подвижный прижим

Рисунок 3.27– Конечно-элементная сетка

Для расчета разверток использовался упрощенный метод обратного подхода (Inverse) используемый в PAM-STAMP [30](см.Рисунок 3.28).

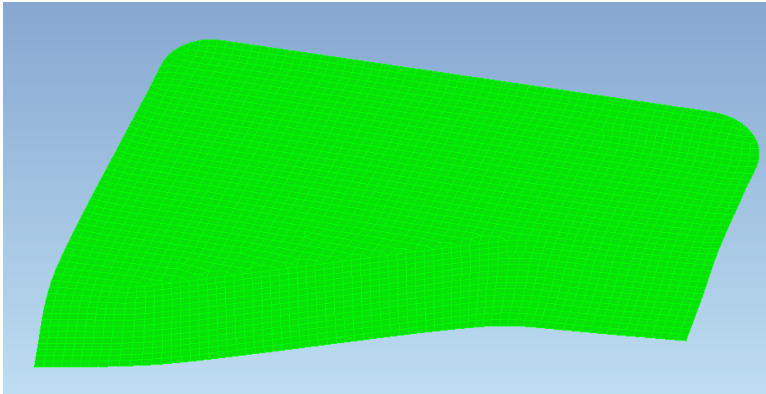


Рисунок 3.28 – Развертка деталь №3

Формообразование проводится на первом переходе путем приложения нагрузки на заготовку от давления «Жидкой ячейки». Второй переход давление по закону Паскаля [96] прикладывается на поверхность контакта подвижного прижима и эластичной среды (график давления берется с первого перехода полученный в результате работы функции «Жидкой ячейки»).

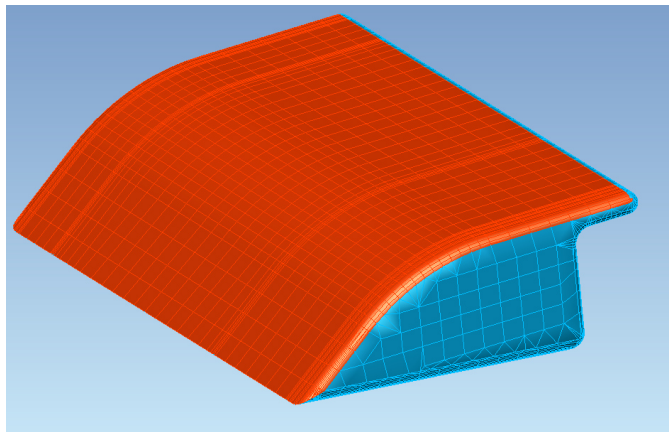
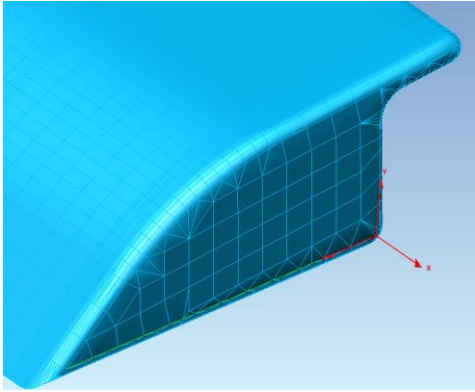
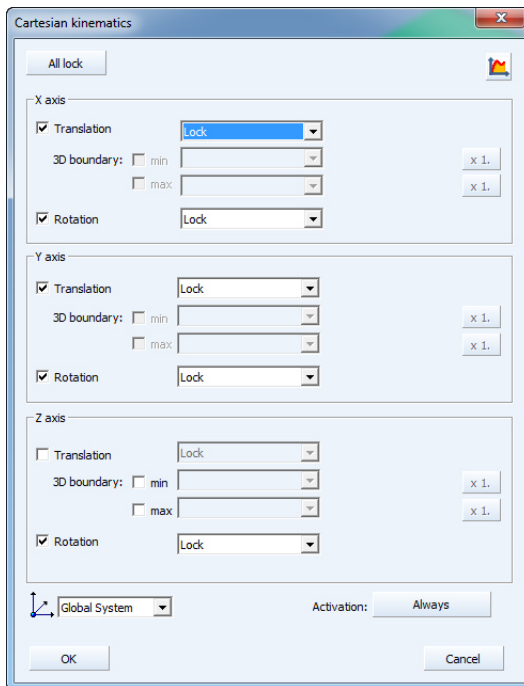


Рисунок 3.29 - Поверхность контакта подвижного прижима с эластичной средой

Подштамповая плита не участвует в расчете. Ее влияние, а точнее движение подвижного прижима задано граничными условиями в ограничениях движения во всех направлениях кроме оси Z системы координат, а также ограничены вращения во всех осях (см.Рисунок 3.30). На оснастку наложены ограничения полного исключения движения (запрет 3 движения и 3 вращений).



а)

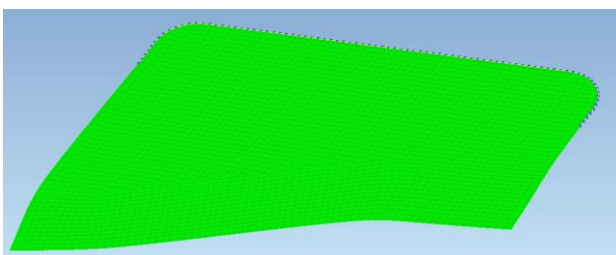


б)

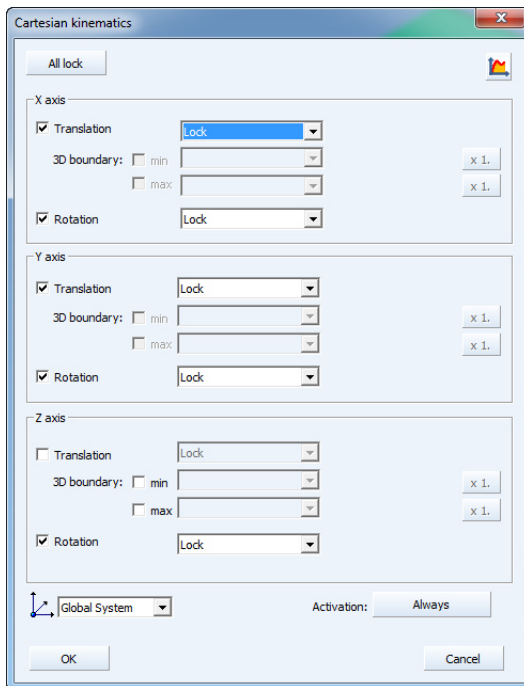
а) система координат для движения подвижного прижима; б) задание граничных условий в программе.

Рисунок 3.30 - Граничные условия подвижного прижима

На заготовку наложены ограничения движения в районе упора по всем осям кроме оси Z , а также ограничены вращения во всех осях (см.Рисунок 3.31).



a)



б)

а) ребра конечных элементов для задания граничных условий; б) задание граничных условий в программе.

Рисунок 3.31 - Граничные условия заготовки

В результате расчета были получены следующие результаты (результаты приведены для зоны детали которую показывает Рисунок 3.32):

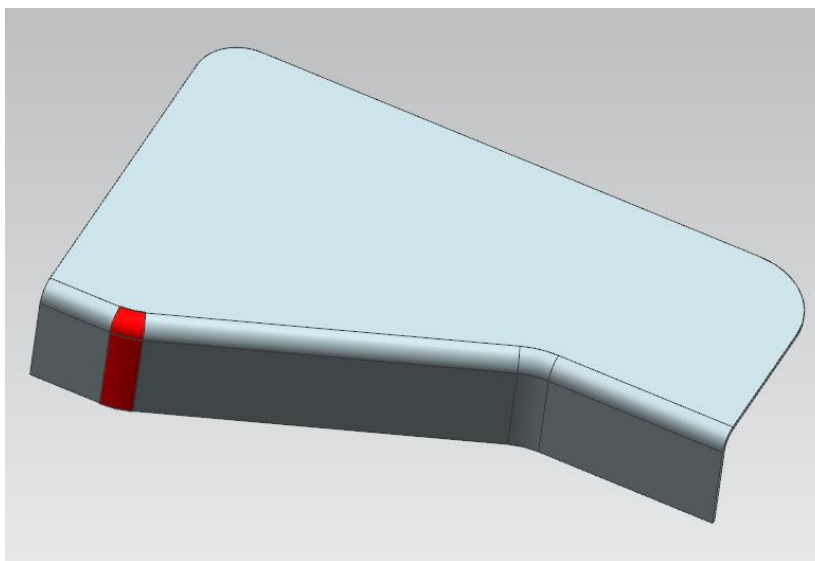


Рисунок 3.32 - Зона детали для которой показаны результаты моделирования

– график зависимости давления формообразования от времени сгенерированный функцией «жидкая ячейка» (при заданных значениях $V_{imp} = 3 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$; contact ratio = 0,99; SIGV=4). Величина требуемого давления для первого перехода задана 3,627 МПа (см.Рисунок 3.33).

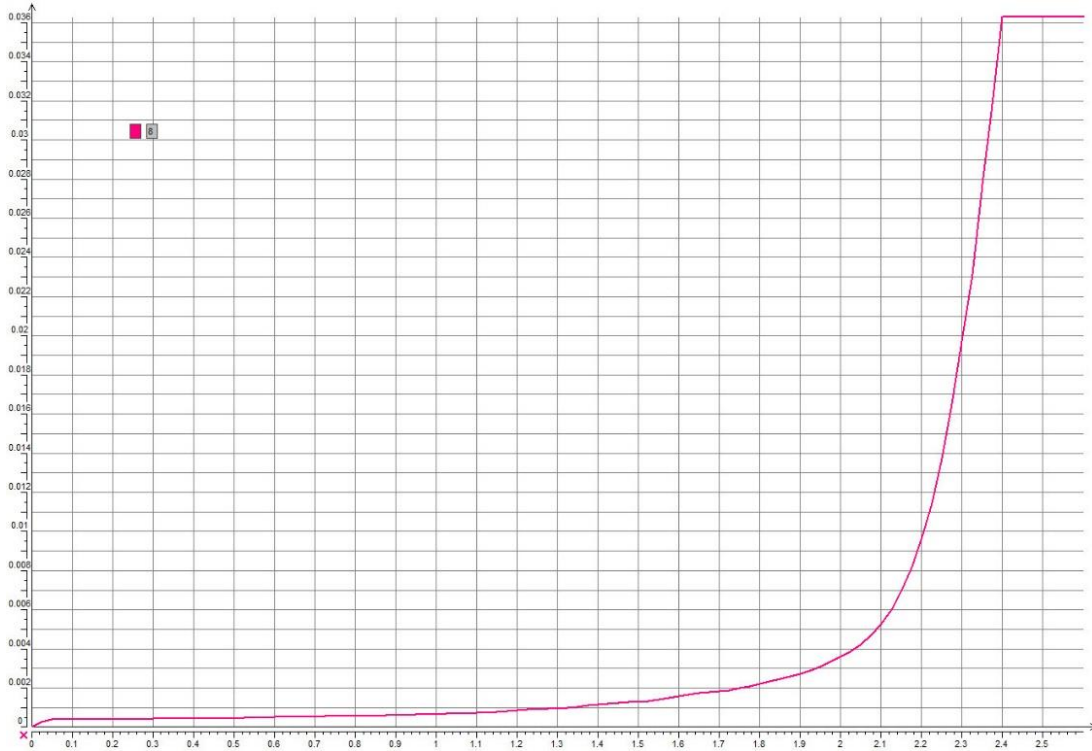


Рисунок 3.33 – График давления для первого перехода

– величина длины развертки при горообразовании ($L=8,064$ мм.) что меньше расчетной (8,2 мм.) (Рисунок 2.37) на 1,7 % так что результаты можно считать идентичными (см.Рисунок 3.34).

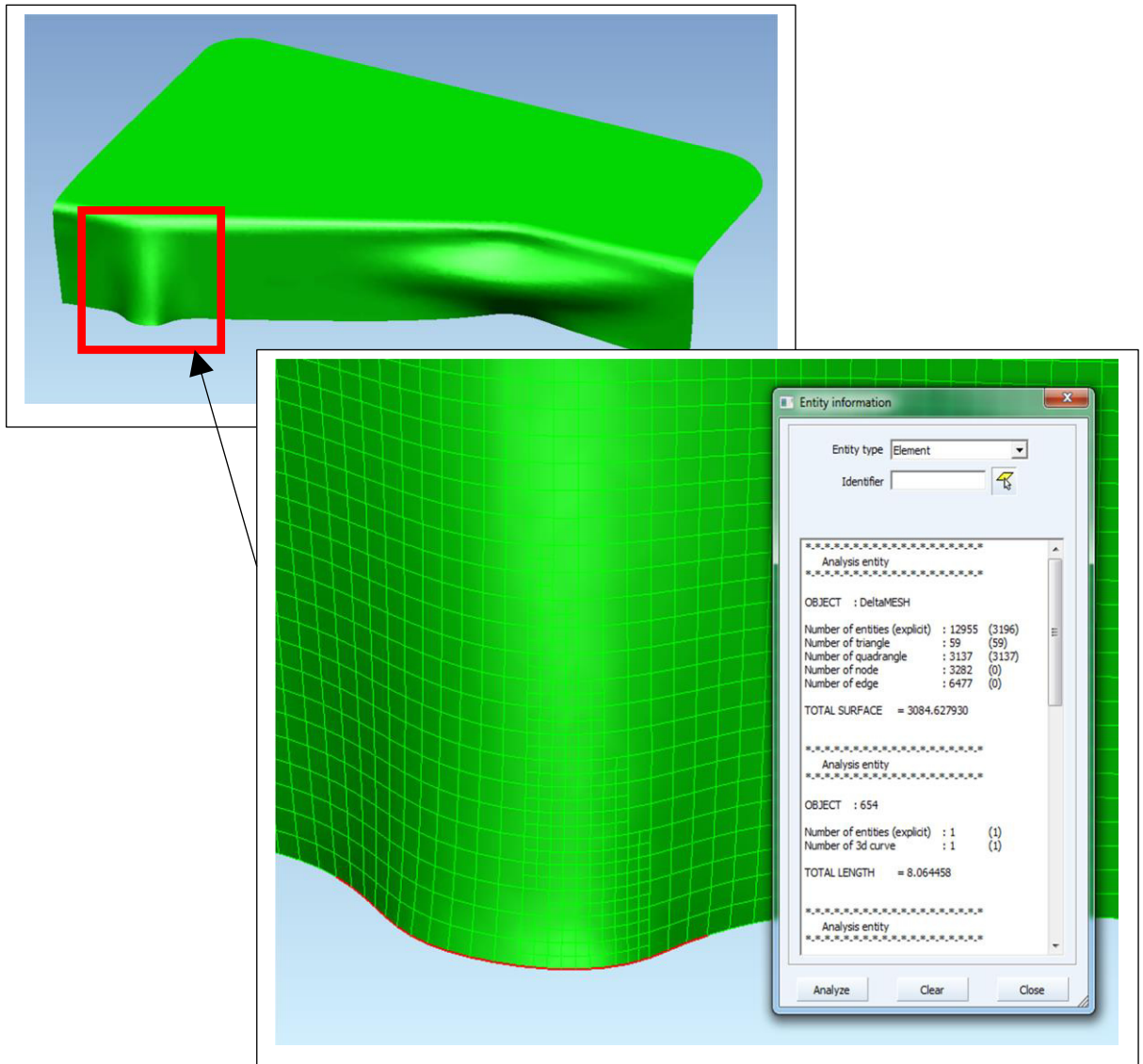


Рисунок 3.34 – Длина развертки при давлении 3,627 МПа

– график зависимости давления формообразования от времени для второго перехода при условии максимума давления в 30 МПа (при заданных значениях $V_{imp}=3$ мм/с; $contact\ ratio=0,99$; $SIGV=4$) (см.Рисунок 3.35);

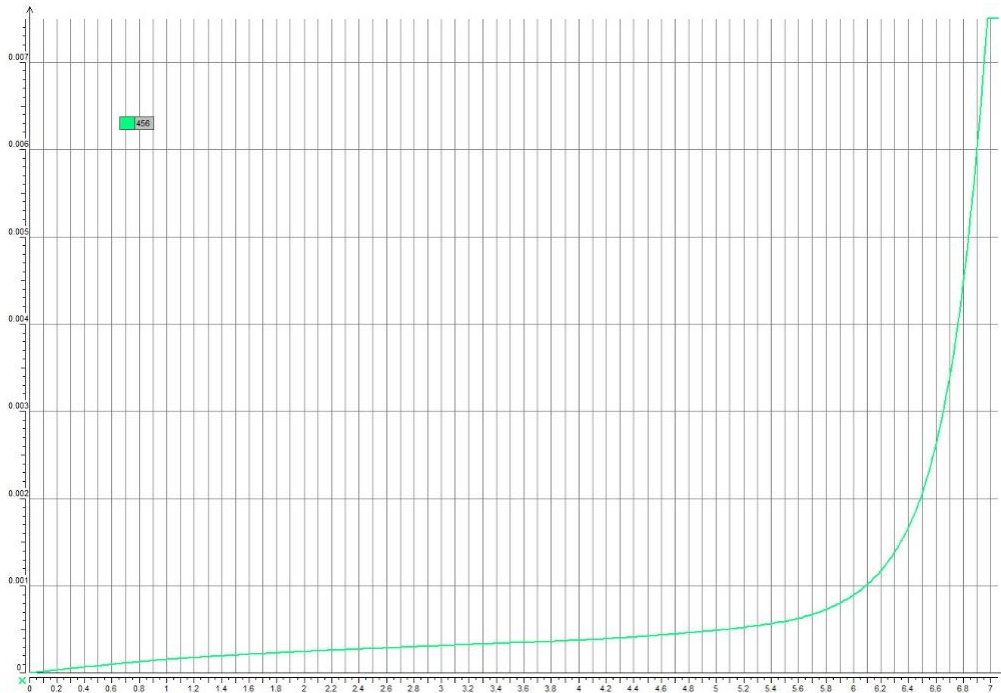


Рисунок 3.35 - График давления для второго перехода

— эквивалентные напряжения, считаемые по формуле энергетической теории прочности [63, 67](см.Формула (3.23).

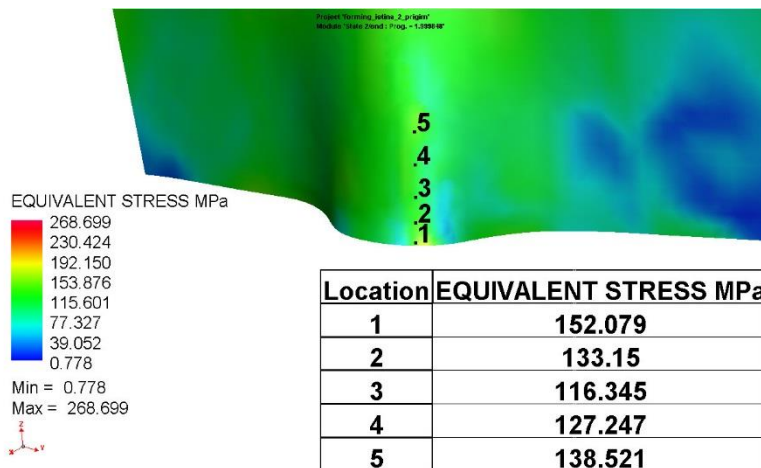


Рисунок 3.36 – Градиент напряжений для 1 перехода

Разница между $\sigma_{1 \text{ пер}} = 159,357$ МПа (см.Глава 2 ,Формула (2.96) рассчитанной аналитически и $\sigma_{\text{эkv } 1 \text{ пер}} = 152,079$ (см.Рисунок 3.36) составляет 4,6% так что результаты можно считать идентичными.

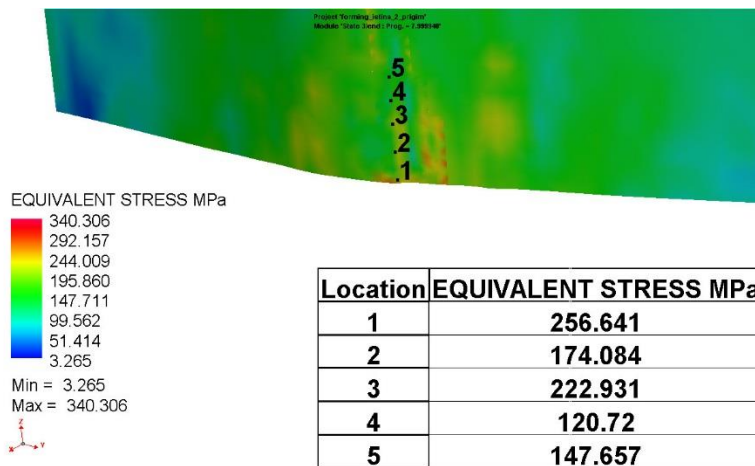


Рисунок 3.37 - Градиент напряжений для 2 перехода

Разница между $\sigma_{\text{под1}} = 244,42 \text{ МПа}$ (см.Глава 2, см.Формула (2.80) рассчитанной аналитически и $\sigma_{\text{экв 2 пер}} = 256,641$ (см.Рисунок 3.37) составляет 4,8% так что результаты можно считать идентичными;

– деформации общие. Считаемые из формулы длины вектор [9](см.Формула (3.24).

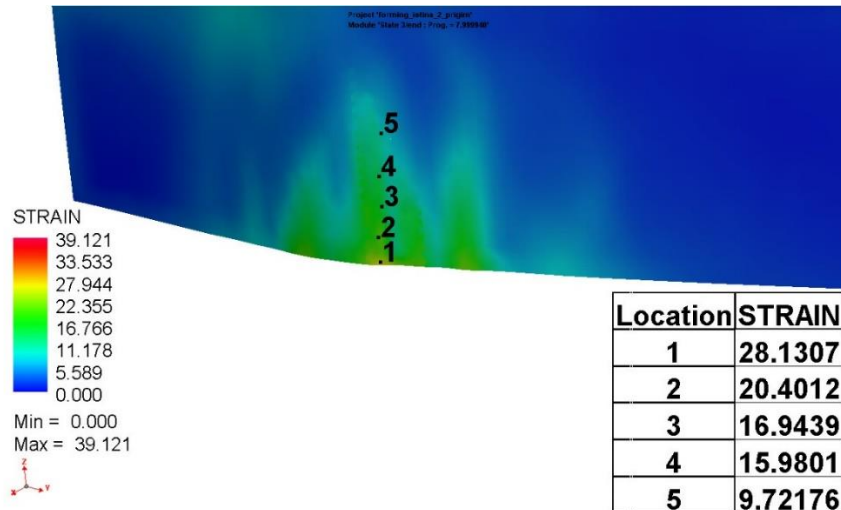


Рисунок 3.38 – Градиент распределения деформаций

Разница между $\varepsilon_{\text{посад}} = 27,4\%$ рассчитанной аналитически и $\varepsilon = 28,13\%$ (см.Рисунок 3.38) составляет 2,7% так что результаты можно считать идентичными;

– толщина. Так как зона утонения отличается от зоны гофрообразования (см.Глава 2, Рисунок 2.42), то зона для результатов распределения толщины изменена.

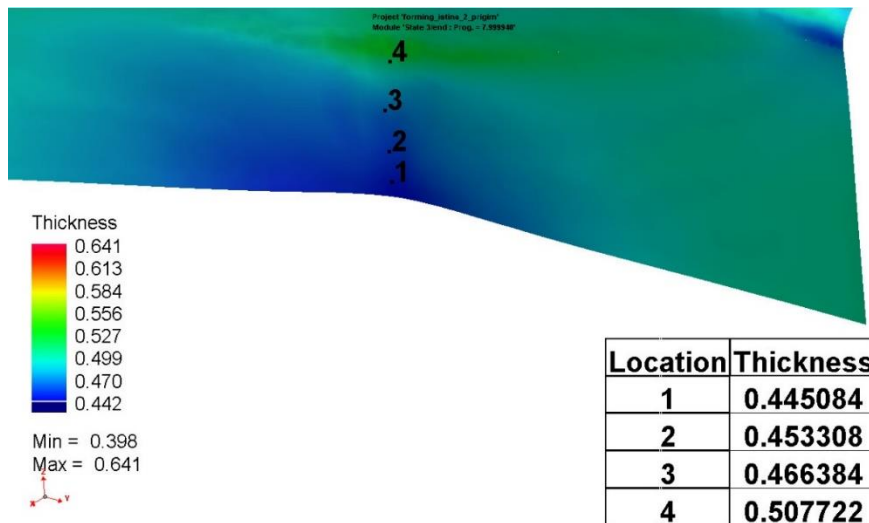


Рисунок 3.39 – Распределение толщин

Разница между $s_{i(min)} = 0,441\text{мм}$. (см.Глава 2, см.Формула (2.105) рассчитанной аналитически и $s_{\text{мин}} = 0,445\text{мм}$. (см.Рисунок 3.39) составляет 0,8% так что результаты можно считать идентичными

3.5. Выводы

1. Созданы комплекты оснасток для формообразования детали №2 и детали №3.
2. Проведено конечно-элементное моделирование процесса формообразования с подвижным прижимом детали №2 и детали №3.
3. По результатам моделирования для детали №2 и детали №3 показано что предлагаемая математическая модель по расчету утонения, деформаций, напряжений и расчета потребного давления для первого перехода (необходимо только для детали №3) имеет минимальные различия (не более 5%) с методом конечных элементов, т.е предлагаемая модель подтвердила свою адекватность при сравнении с методом конечных элементов.

4. Натурные эксперименты, опытные работы и анализ изменение параметров по номограмме

Для окончательной верификации результатов предлагаемой модели поведения материала и расчета характеристик дополнительных элементов оснастки необходимо провести натурные эксперименты. Для этого в первую очередь был изготовлен весь комплект оснастки по разработанным моделям в CAD системе. Для этого был использован фрезерный 5-ти координатный обрабатывающий центр DMU 80 P / FD duoBLOCK (см.Рисунок 4.1, Таблица 4.1).



Рисунок 4.1 - Центр DMU 80 P / FD duoBLOCK

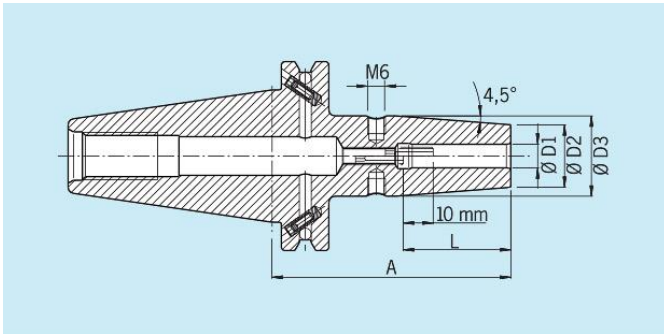
Таблица 4.1 - Технические характеристики станка

Параметр	Размерность	Численная характеристика
Рабочая зона		
Ось X/Y/Z	мм.	800x1050x850
Стол/рабочая зона/заготовки		
Наклонно-поворотный стол с ЧПУ	об/мин	40

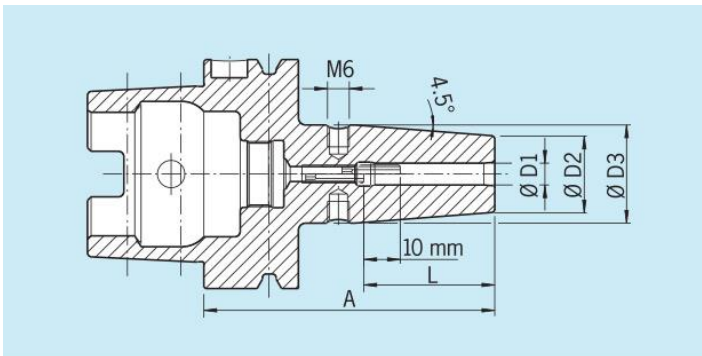
Параметр	Размерность	Численная характеристика
Размер стола	мм.	∩ 900x700
Макс, загрузка стола	кг	1800
Стол для фрезерно-токарной обработки (FD)	об/мин	800
Размер стола	мм.	0 900
Макс, загрузка стола	кг	1400
Поворотная фрезерная головка с ЧПУ ось В)		
Диапазон поворота (0 = верт. / 180 = гориз.)	Градусы	-30...180
Ускоренный ход и подача	об/мин	30
Опции для 5-осевой обработки		
5X-torqueMASTER ось В с ЧПУ и редукторным шпинделем	-	есть
Диапазон поворота (0 = верт. / 180 = гориз.)	Градусы	0 ... 180
Ускоренный ход и подача	об/мин	30
Поворотная фрезерная головка с ЧПУ (ось А)		есть
Диапазон поворота (0 = верт. /-90 = гориз.)	Градусы	-125/+35
Ускоренный ход и подача	об/мин	30
Главный привод		
Встроенный мотор-шпиндель	об/мин	15 000
Зажим инструментов		SK 40/HSK-A63
Мощность 140/100% ED]	кВт	35/25

Параметр	Размерность	Численная характеристика
Крутящий момент (40/100% ED)	Н·м	130/86
Устройство смены инструментов		
Зажим инструментов	-	SK40
Инструментальный магазин, дисковый	поз.	40 (63, 123)
Линейные оси (X/Y/Z)		
Скорость подачи / ускоренного хода	м/мин	60
Ускорение	м/с ²	7
Сила подачи	кН	13/18/25
P _{тах} [X/Y/Z] - VDI DGQ 3441 /ISO 230-2	мкм	5
P _{max} [X/Y/Z] - VDI DGQ 3441 /ISO 230-2	мкм	4
Характеристики станка		
Площадь, занимаемая станком в базовой комплектации с транспортером для удаления стружки, без системы подачи СОЖ	м ²	18,9
Высота станка (в стандартной комплектации)	м	3,1
Вес станка	кг	17500

Зажим инструмента осуществлялся зажимами SK 40, HSK-A63 (см.Рисунок 4.2). Патрон изготовлены из жаропрочной стали, термообработаны до 54 HRC, предназначены для инструмента из быстрорежущей стали и твердого сплава и с точной балансировка с помощью балансировочных болтов.



а)



б)

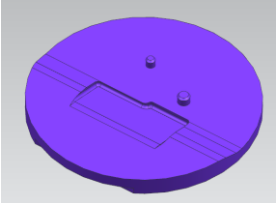

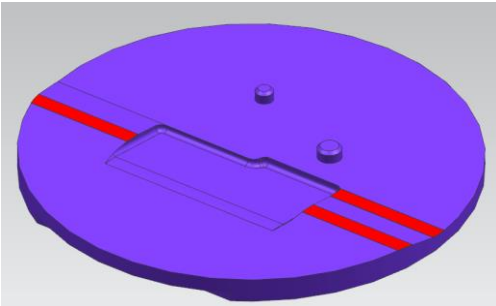

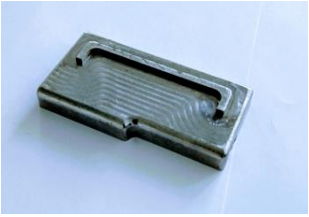
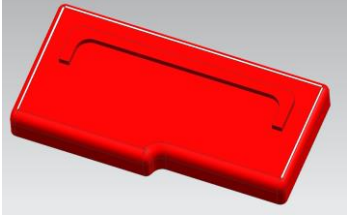
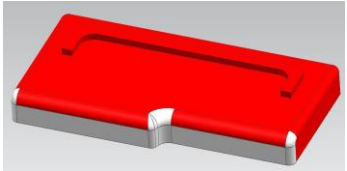
а) SK 40; б) HSK-A63.

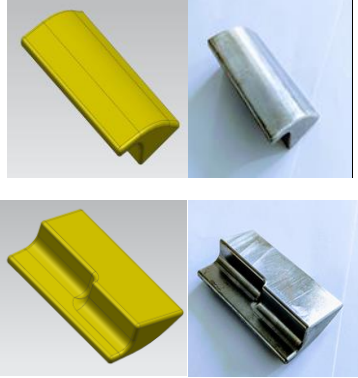
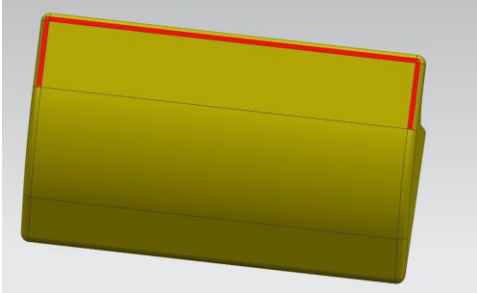
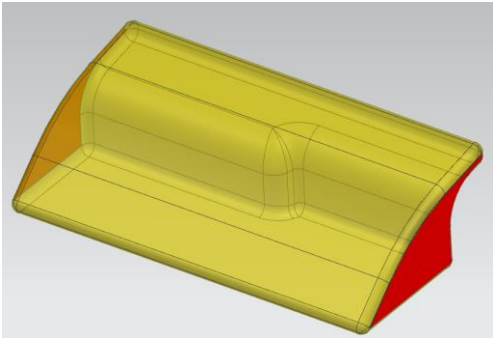
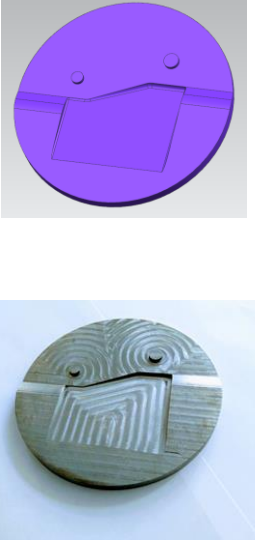
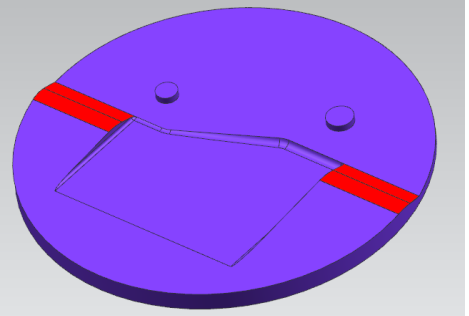
Рисунок 4.2 - Зажимы инструмента

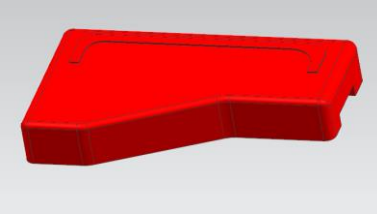

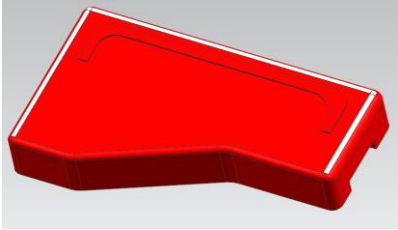
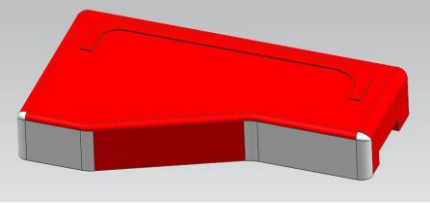
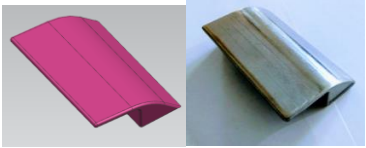
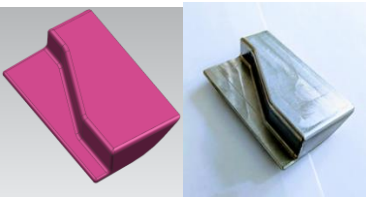
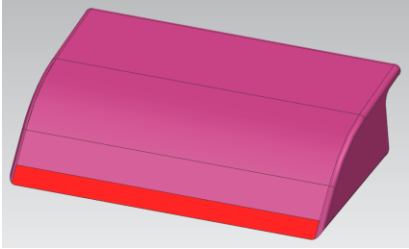
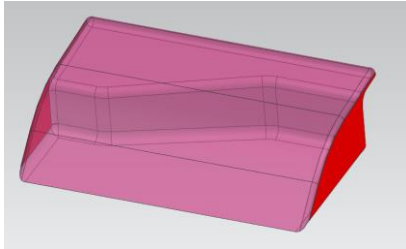
В результате был изготовлен комплект оснастки для первой и второй детали из стали 3. Анализ зарезов и недорезов проводился средства Siemens NX в модуле «Обработка». Siemens NX обеспечивает возможность динамического удаления материала одновременно с воспроизведением траектории инструмента в контексте полной модели заготовки, с возможностью динамического перемещения и масштабирования изображения в виде. Заготовка представляется как объемный триангулированный объект (с малым размером треугольной пирамиды) при столкновении с инструментом элементы этого объекта постепенно удаляются. В

результате после чистовой обработки можно проанализировать где остался материал, а где снято больше материала [6].

Таблица 4.2 – Анализ зарезов и недорезов

Электронная модель и изготовленная оснастка	Точность изготовления
 	<p>Максимальная погрешность от $+0,016$ мм. до $-0,00536$ мм. в местах плавных радиусных переходов</p>  <p>Отклонения по остальным зонам в пределах $+0,0061$ мм.</p>
 	<p>Максимальная погрешность в плюс $0,056$ мм. в местах начала радиусных переходов</p>  <p>Максимальная погрешность в минус $0,0095$ мм. в местах, указанных на рисунке</p>  <p>Отклонения по остальным зонам в пределах $+0,0233$ мм.</p>

Электронная модель и изготовленная оснастка	Точность изготовления
	<p>Максимальная погрешность в плюс 0,4019 мм. в местах начала радиусных переходов вверху прижима</p>  <p>Максимальная погрешность в минус 0,0284 мм. на боковых сторонах</p>  <p>Отклонения по остальным зонам в пределах +0,0028 мм.</p>
	<p>Максимальная погрешность от +0,139 мм. до -0,0058 мм. в местах плавных радиусных переходов</p>  <p>Отклонения по остальным зонам в пределах -0,0007 мм.</p>

Электронная модель и изготовленная оснастка	Точность изготовления
 	<p data-bbox="635 309 1417 412">Максимальная погрешность в плюс 0,0453 мм. в местах начала радиусных переходов</p>  <p data-bbox="627 685 1425 788">Максимальная погрешность в минус 0,0188 мм. в местах, указанных на рисунке</p>  <p data-bbox="671 1032 1382 1135">Отклонения по остальным зонам в пределах +0,0058 мм.</p>
 	<p data-bbox="635 1162 1417 1265">Максимальная погрешность в плюс 0,1785 мм. в местах начала профиля прижима</p>  <p data-bbox="639 1554 1412 1657">Максимальная погрешность в минус -0,0271мм. на боковых сторонах</p>  <p data-bbox="671 1946 1382 2049">Отклонения по остальным зонам в пределах +0,0019 мм.</p>

В целом погрешности в изготовленных оснастках не существенны и сосредоточены в не критичных зонах (см.Таблица 4.2)[53].

4.1. Пресс для формообразования и блок эластоформования

Для проведения натурального эксперимента была сделана на основе прессы ИП1250 экспериментальная установка для формовки эластичной средой (см.Рисунок 4.3, Таблица 4.3).



Рисунок 4.3 – Пресс ИП1250

Таблица 4.3 – Технические характеристики прессы ИП1250

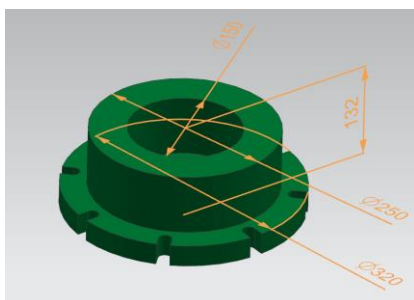
Наименование характеристик	Характеристика
Наибольшая номинальная нагрузка, кН	1250
Максимальная высота рабочего пространства, мм	800
Ширина рабочего пространства, мм	470
Максимальный ход поршня рабочего цилиндра, мм	150
Размер опорных плит, мм **	450×450

Наименование характеристик	Характеристика
Цена единицы наименьшего разряда силоизмерителя, кН	0,1
Относительная погрешность измерения нагрузки в диапазоне 2..100% от максимальной нагрузки,%	± 1
Класс точности индикации нагрузки по ISO 7500-1	1 - базовое исполнение
Цена единицы наименьшего разряда канала измерения перемещений опорной плиты, мм	0,005
Наибольшая скорость перемещения поршня рабочего цилиндра без нагрузки, мм/мин	95
Диапазон рабочих скоростей нагружения, кН/с	1,0...100
Пределы допускаемой погрешности поддержания скорости нагружения, %	± 5 с автоматизированным управлением
Габаритные размеры испытательной машины, мм	1920×820×2180
Масса нетто / брутто, кг, не более	2700/3000
Габаритные размеры упаковки, мм	2700×1275×1000 900×950×1600
Параметры питания	380 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, кВт, не более	3,5

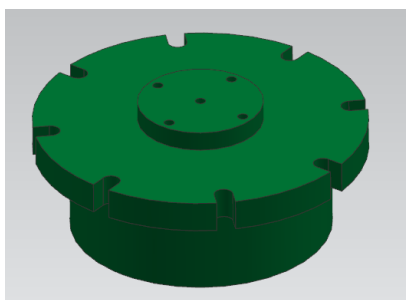
В качестве блока эластоформования был использован блок из стали 3 (см. Рисунок 4.4).



а)



б)



в)

а) блок эластоформования в металле; б) геометрическая модель блока эластоформования; в) нижняя часть блока эластоформования.

Рисунок 4.4 - Блок эластоформования

В блок по средствам прессы ИП 1250 было запрессовано 3 цилиндрических куска полиуретана $\varnothing 150$ и толщиной 30 мм. (см.Рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Полиуретан

Также чтобы усилить блок и предотвратить разлет мелких частей блока при его разрушении во время формообразования проведена обмотка наружного контура обвязочной проволокой (см.Рисунок 4.6).

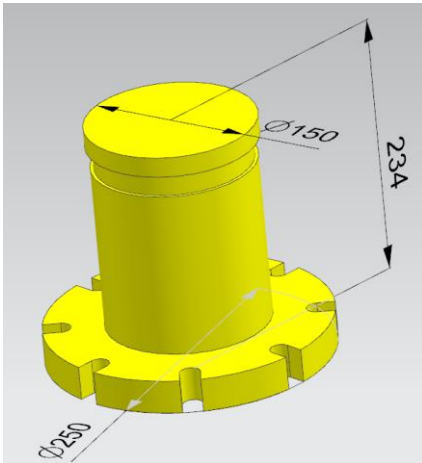


Рисунок 4.6 – Обмотка блока эластоформования

Так же с блоком использовалась ответная часть из того же материала (см.Рисунок 4.7).



а)



б)

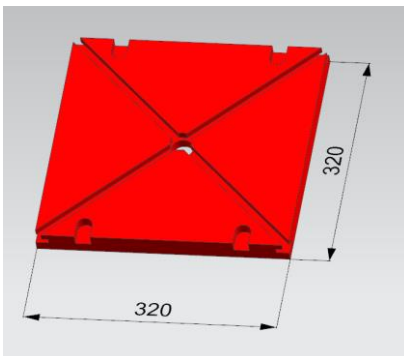
а) ответная часть блока эластоформования в металле; б) геометрическая модель блока эластоформования.

Рисунок 4.7 – Ответная часть блока эластоформования

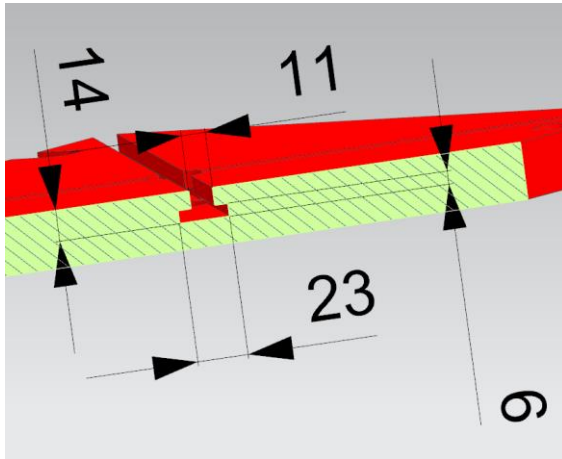
Блок эластоформования и ответная часть крепились к фиксирующим плитам имеющие вырезы типа «т-образный» [12] по средствам болтов (см.Рисунок 4.8).



а)



б)



в)

а) фиксирующая плита в металле; б) геометрическая модель фиксирующей плиты; в) размеры т-образного выреза.

Рисунок 4.8 – Фиксирующая плита

Плиты с закрепленным блоком и ответной частью крепились к плитам прессы ИП 1250 по средствам фрезерованных профилей (см.Рисунок 4.10) и струбцин. Профиля изготавливались путем фрезерования из двутавра 16Б2 (см.Рисунок 4.9) [124].

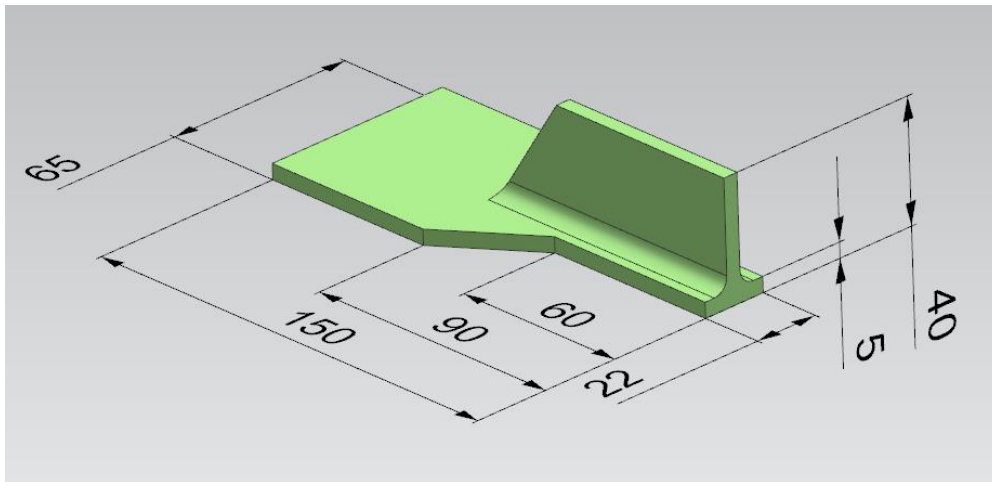
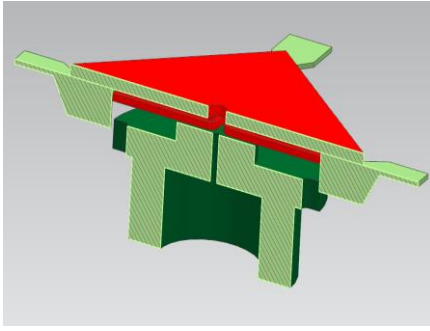
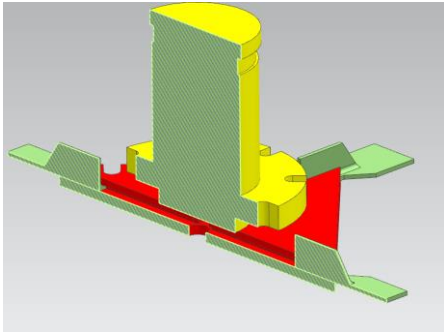


Рисунок 4.9 – Геометрическая модель фрезерованного профиля



а)



б)

а) блок эластоформования в разрезе с фиксирующей плитой и фрезерованными профилями; б) ответная часть в разрезе с фиксирующей плитой и фрезерованными профилями.

Рисунок 4.10 – Установка фрезерованных профилей

В результате вся конструкция представлена на рисунке в установленном виде на прессе ИП1250 (см.Рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Вся конструкция для формообразования деталей эластичной средой в сборе

Площадь воздействия давления для создания усилия можно найти [30] по формуле (2.37). Исходя из этого можно вывести формулу для среднего давления (см.Формула (4.1)):

$$p_{\text{ср}} = p_{\text{фор}} = \frac{F}{S_{\text{эласт}}} \quad (4.1)$$

Исходя из того, что в нашем случае эластичная среда представляет цилиндр то площадью будет являться площадь круга (см.Формула (4.2)):

$$S_{\text{эласт}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,141 \cdot (150\text{мм.})^2}{4} = 17671,459 \text{ мм.}^2 \quad (4.2)$$

Тогда подставляя формулу (4.2) в формулу (4.1) получим (см.Формула (4.3)):

$$p_{\text{фор}} = \frac{F}{17671,459 \text{ мм.}^2} \quad (4.3)$$

График для определения усилия при заданном формообразующем давлении выглядит следующим образом (см.Рисунок 4.12).

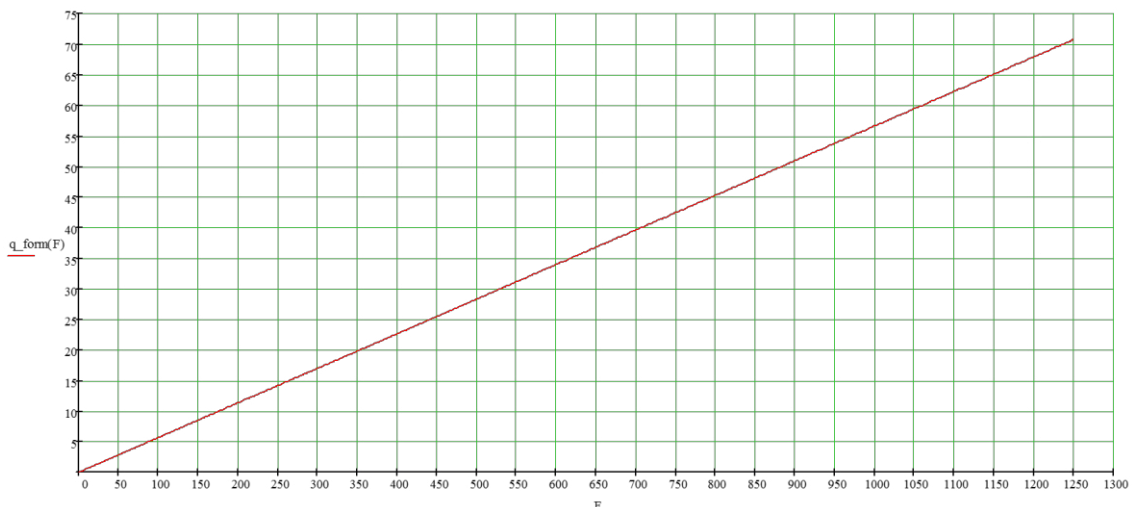


Рисунок 4.12 – График зависимости формообразующего давления от усилия

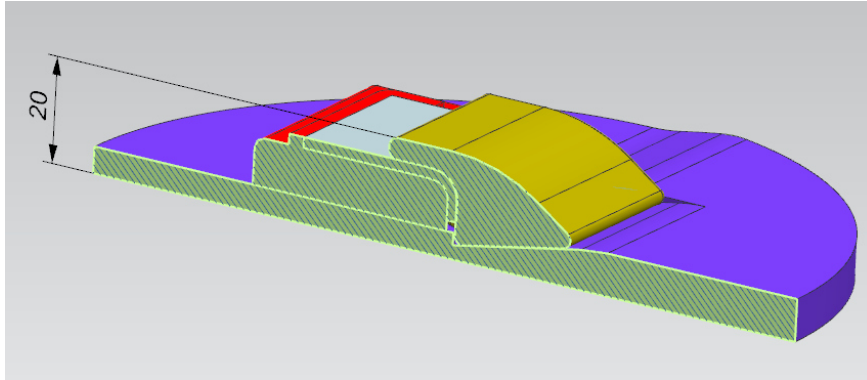
Исходя из рекомендаций по формообразованию эластичной средой [26] для исключения повреждения ластичной среды по высоте эластичная среда не должна сжиматься более чем на 30%. В нашем случае общая высота эластичной среды равна трем высотам эластичного цилиндра (см.Формула (4.4)).

$$h_{\text{пол}} = 3 \cdot h_{\text{цил}} = 3 \cdot 30 \text{ мм.} = 90\text{мм.} \quad (4.4)$$

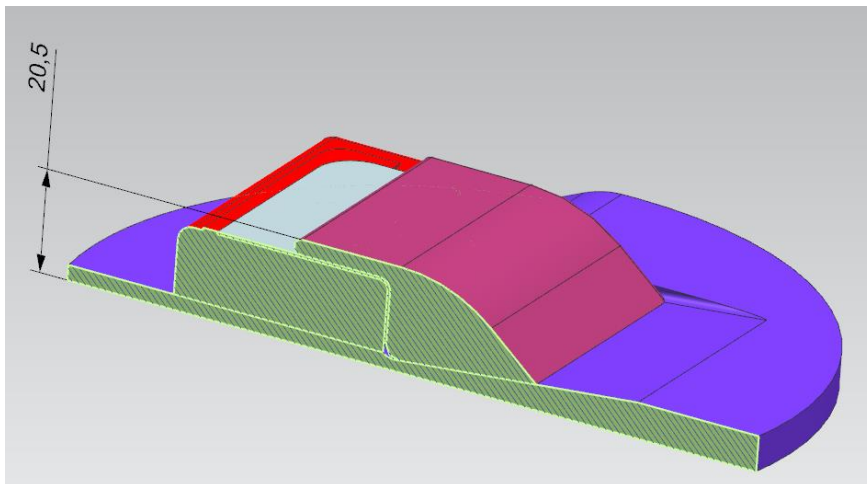
Исходя из рекомендации предельная высота оснастки для формообразования будет равна (см.Формула (4.5):

$$h_{\text{пред}} = h_{\text{пол}} \cdot 0,3 = 27\text{мм.} \quad (4.5)$$

Как показывает Рисунок 4.13 комплект оснастка для первой и второй детали не превышает значения в формуле (4.5).



а)



б)

а) комплект оснастки для детали №2 высота 20 мм.; б) комплект оснастки для детали №3 высота 20,5 мм.

Рисунок 4.13 – Высота комплектов оснасток

4.2. Натурный эксперимент детали №2 и №3 и анализ результатов

По упрощенному методу обратного подхода (Inverse) используемый в RAM-STAMP рассчитана развертка (см.Рисунок 3.14) для детали №2 и изготовлена из материала Д16АМ. Развертка использована для формообразования детали за два перехода на экспериментальной установке:

- 1 переход 30МПа (530,144 кН) без подвижного прижима;
- 2 переход 30МПа (530,144 кН) с подвижным прижимом.

В результате была отформована деталь. Рисунок 4.14 показывает деталь после первого и второго перехода.

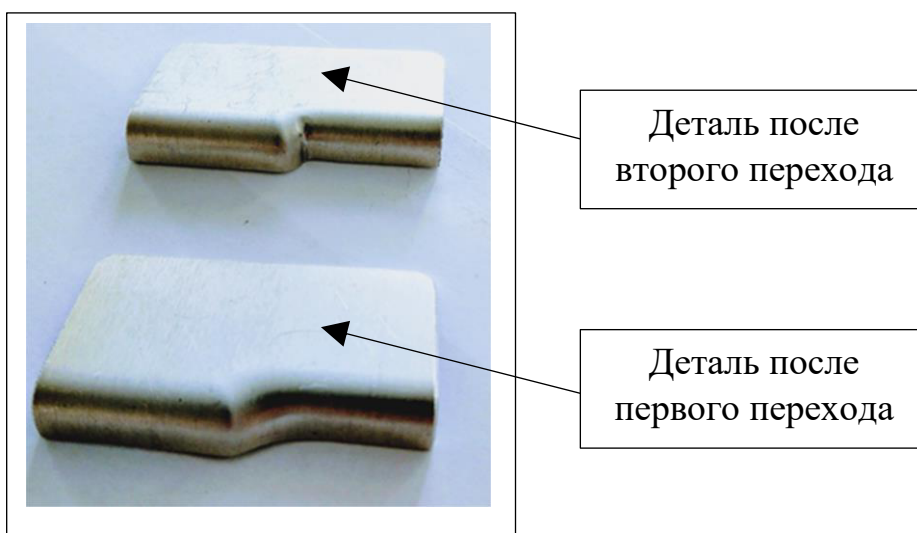


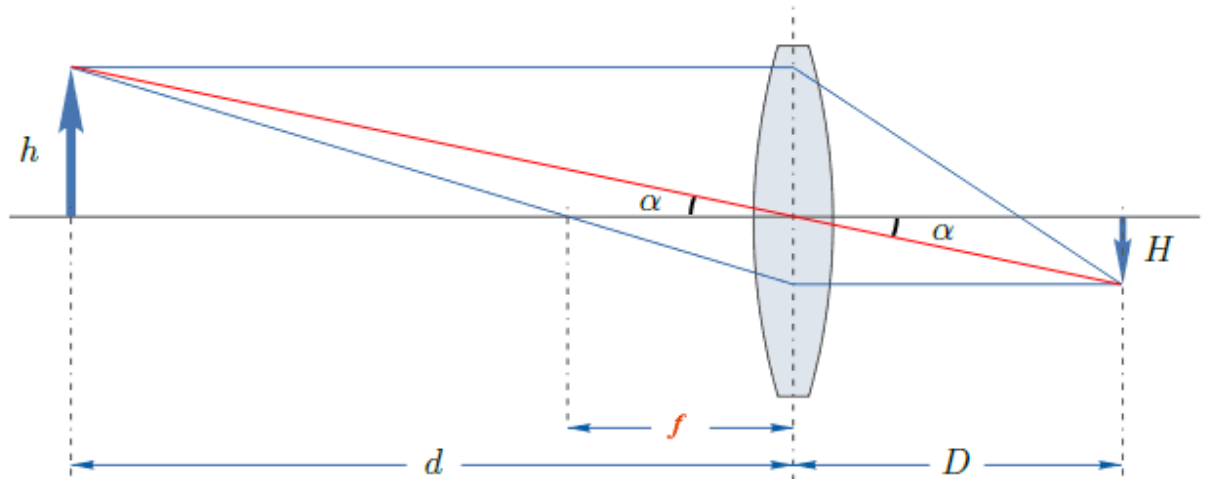
Рисунок 4.14 – Отформованная деталь №2

Для определения максимального утонения и распределения толщин на детали воспользуемся фотограмметрией и теорией линз [33]. Для этого необходимо сделать фото деталь после второго перехода камерой характеристики, которой нам известны таким образом, чтобы торец с подсекой был параллельно столу. В качестве фотокамеры выбрана Sony IMX362 Exmor RS установленная в смартфоне HTC U11. Sony IMX362 Exmor RS имеет следующие характеристики:

- размер матрицы - 3,39 см. x 2,54 см.;
- фокусное расстояние - 4 мм.;
- количество мегапикселей камеры - 12 Мп;

- диафрагма - $f/1.7$;
- разрешение 4032 x 3024.

Известно, что ход лучей в тонкой линзе идет по следующей схеме (см.Рисунок 4.15).



d — расстояние от линзы до объекта, D — расстояние от линзы до изображения объекта (на матрице или плёнке), а f — фокусное расстояние линзы.

Рисунок 4.15 – Схема хода лучей в тонкой линзе

Величины которые показывает Рисунок 4.15 находятся в зависимости между собой и определяются формулой, называемой формулой тонкой линзы, полученной Исааком Барроу (см.Формула (4.6) [28]:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{D} = \frac{1}{f} \quad (4.6)$$

Теперь ещё раз посмотрим на оптическую схему (см.Рисунок 4.15): h — это линейный размер объекта съёмки, а H — размер его уменьшенного изображения. Исходя, что $h = d \cdot \tan(\alpha)$, а $H = D \cdot \tan(\alpha)$ (это следует из свойств прямоугольного треугольника [98]). Подставив эти величины в формулу (4.6), $\tan \alpha$ сокращается, и в результате получим следующее уравнение (см.Формула (4.7):

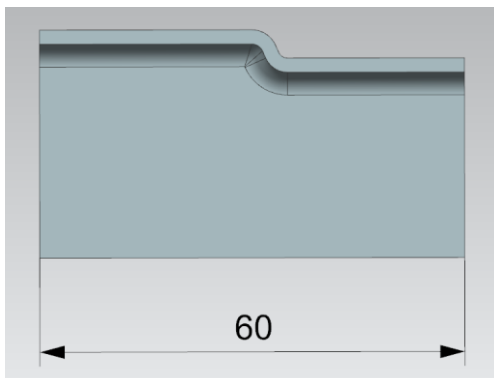
$$1 + \frac{h}{H} = \frac{d}{f} \quad (4.7)$$

Сделан снимок. Его разрешение 4032 x 3024. Для отыскания толщины нам нужно расстояние от линзы до объекта. Расстояние можно высчитать, зная одну из

величин на фото в размерах. Воспользуемся одним из известных габаритов детали (см.Рисунок 4.16).



а)



б)

а) фото отформованной детали №2; б) геометрическая модель детали №2 с габаритным размером.

Рисунок 4.16 – Сравнение фото реальной детали и геометрической модели

Так как конкретные физические размеры имеет матрица фотоаппарата и фотография не была кадрирована или повёрнута, поэтому мы можем узнать точный линейный размер изображения на матрице, можно высчитать каким было разрешение фото на матрице. На выходе фото имеет разрешение 72 писк/дюйм = 28,346 писк/дюйм. Чтобы сохранились пропорции необходимо вычислить новое разрешение при уменьшении размеров (см.Формула (4.8)).

$$\theta = \frac{3024 \text{ писк}}{2,54 \text{ см}} = 1190,551 \frac{\text{писк.}}{\text{см.}} \quad (4.8)$$

Для масштабирования по заданным параметрам используем программный комплекс Adobe Photoshop CS5 (см.Рисунок 4.17).

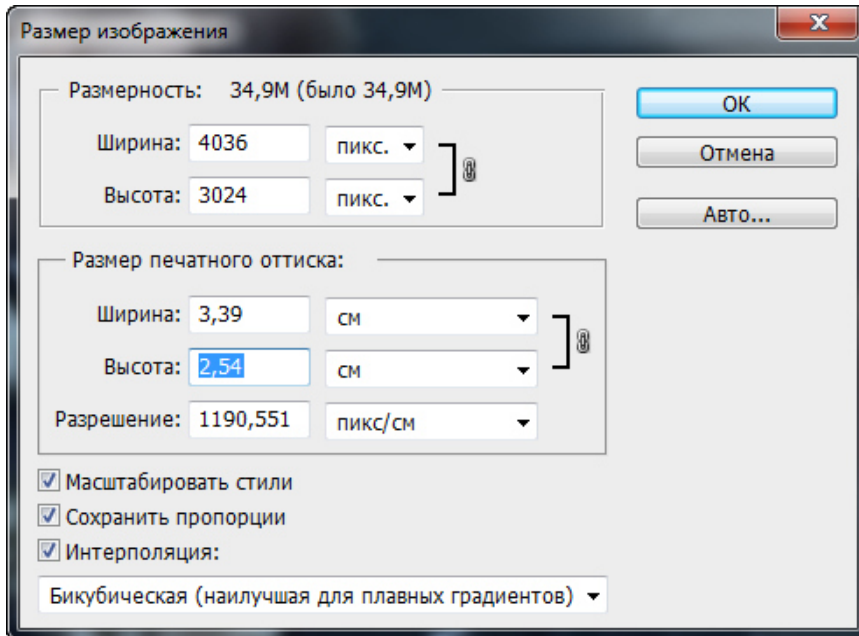


Рисунок 4.17 – Масштабирование фото в программном комплексе Adobe Photoshop CS5

Формула для расчета расстояния от линзы до объекта из формулы (4.7) выглядит следующим образом (см.Формула (4.9):

$$d = f \cdot \left(1 + \frac{h}{H}\right) \quad (4.9)$$

Теперь проведем замер известного размера на фото и определим его значение (см.Рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 – Замер габаритного размера детали №2 на масштабированном фото

Исходя из этого можем вычислить величину d (см.Формула (4.10):

$$d = 4 \text{ мм.} \cdot \left(1 + \frac{60 \text{ мм.}}{19,2307 \text{ мм.}} \right) = 16,48 \text{ мм.} \quad (4.10)$$

Зная расстояние от линзы до объекта были произведены замеры толщин на матричном изображении в районе подсечки (см.Рисунок 4.19).

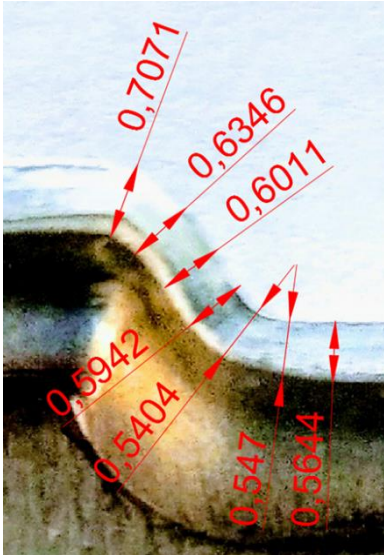


Рисунок 4.19 – Замер толщин на матричном изображении в районе подсечки

Формула для линейного размера объекта съёмки из формулы (4.7) выглядит следующим образом (см.Формула (4.11)):

$$h = H \cdot \left(\frac{d}{f} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Пересчитав по формуле (4.11) значения на рисунке 4.19 получим следующие распределение (см.Рисунок 4.20).

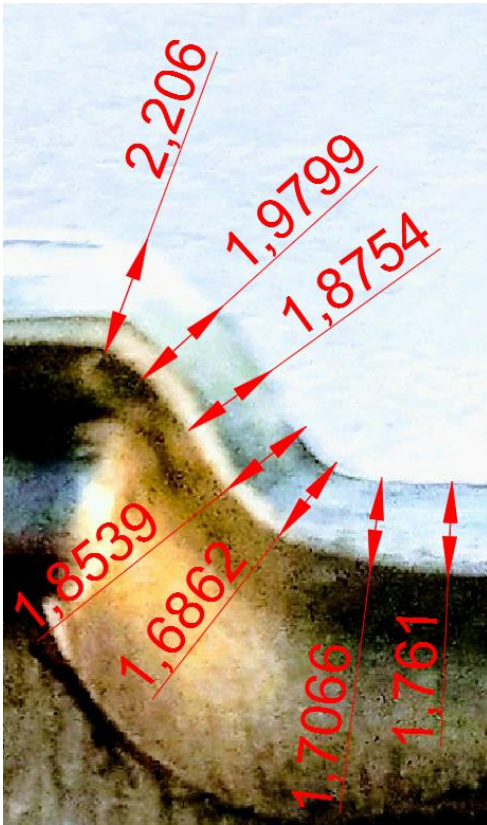


Рисунок 4.20 – Распределение толщин на детали №2 в районе подсечки

Разница между $s_{i(min)} = 1,678\text{мм.}$ (см.Глава 2, Формула (2.29) рассчитанной аналитически по предлагаемой методике отличается от натурального эксперимента $s_{нат (min)} = 1,6862\text{мм.}$ (см.Рисунок 4.20) на 0,488 % так что результаты можно считать идентичными.

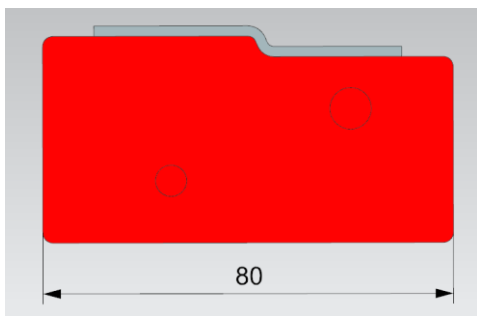
Разница между $s_{мин} = 1,696\text{мм.}$ (см.Глава 3, Рисунок 3.22.) рассчитанной по методу конечных элементов отличается от натурального эксперимента $s_{нат (min)} = 1,6862\text{мм.}$ (см.Рисунок 4.20) на 0,577 % так что результаты можно считать идентичными.

Для подтверждения работоспособности методики и доказательства невозможности изготовления данной детали без подвижного прижима был произведен натуральный эксперимент на производственной установке QFC 1.2x3 - 1000 [68] при давлении 100 МПа. Было сделано фото с оснасткой чтобы торец детали был параллельно столу для оценки недоштаповки (см.Рисунок 4.21 а). По

габаритному размеру оснастки определяем расстояние от линзы до объекта (см.Рисунок 4.21 б, в).



а)



б)



в)

а) фото с оснаткой чтобы торец детали был параллельно столу; б) геометрическая модель оснастки и детали с размером оснастки; в) габаритный размер оснастки на фото.

Рисунок 4.21 – Эксперимент на QFC 1.2x3 -1000

В результате имеем следующие данные исходя из формул (4.9) и (4.10):

– $H = 22,3148$ мм.;

- $d = 18,340258$ мм.;
- $h = 80$ мм.;
- $f = 4$ мм.

По этим данным, по расчетам по формуле Барроу (см.Формула (4.6) и замерам матричного изображения имеем следующие распределение недоштамповки в мм (см.Рисунок 4.22).

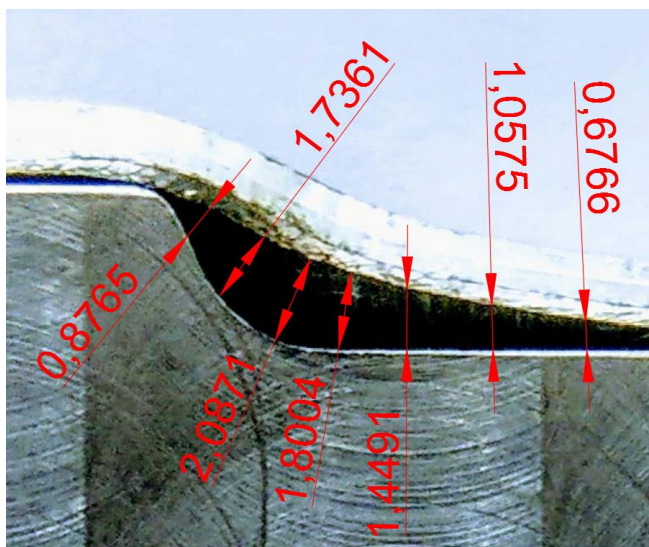


Рисунок 4.22 – Распределение недоштамповки

Эта распределение недоштамповки (см.Рисунок 4.22) после максимального давления в 100 МПа доказывает, что наращивание давления при формообразовании такого рода подсечек не эффективно. Единственный вариант формообразования таких деталей использовать предлагаемую технологию с подвижным прижимом.

По упрощенному методу обратного подхода (Inverse) используемый в РАМ-STAMP рассчитана развертка для детали №3 (см.Рисунок 3.28) и изготовлена из материала Д16АМ. Развертка использована для формообразования детали за два перехода на экспериментальной установке:

- 1 переход 3,627 МПа (64,094 кН) без подвижного прижима;
- 2 переход 7,5 МПа (132,536 кН) с подвижным прижимом.

В результате была отформована деталь. Рисунок 4.23 показывает деталь после первого и второго перехода.

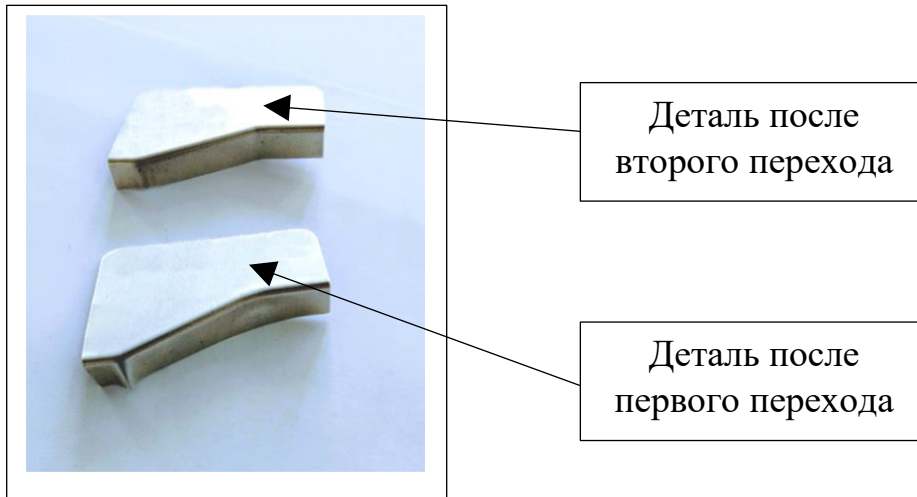
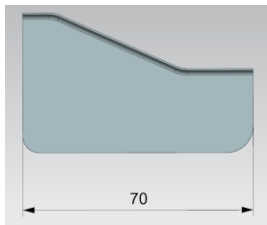


Рисунок 4.23 – Деталь №3 после первого и второго перехода

Используя формулу Барроу (см.Формула (4.6) и параметры камеры проанализируем данные детали после первого перехода (см.Рисунок 4.24).



а)



б)



в)

а) фото детали после первого перехода; б) геометрическая модель детали с габаритным размером; в) габаритный размер детали на фото.

Рисунок 4.24 – Деталь №3 после первого перехода

В результате имеем следующие данные из формул (4.9) и (4.10):

- $H = 20,993$ мм.;
- $d = 18,340258$ мм.;
- $h = 80$ мм.;
- $f = 4$ мм.

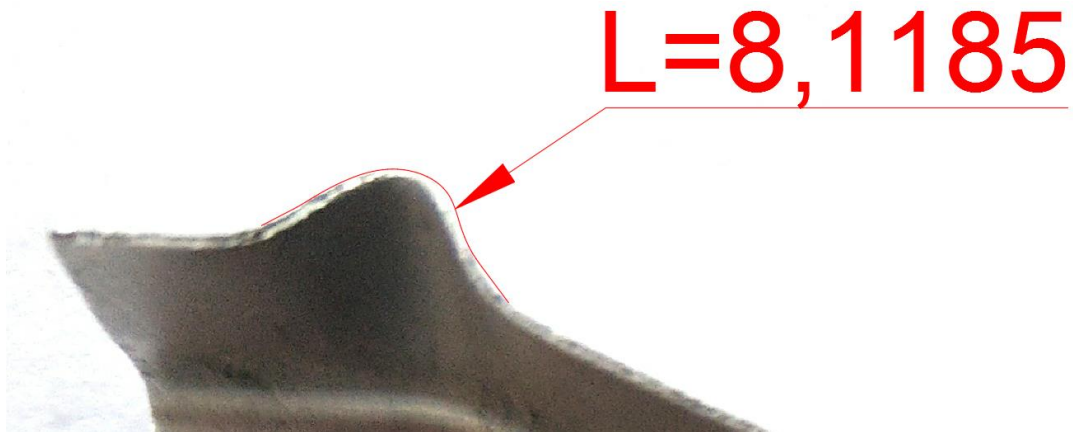


Рисунок 4.25 – Длина гофры на детали №3

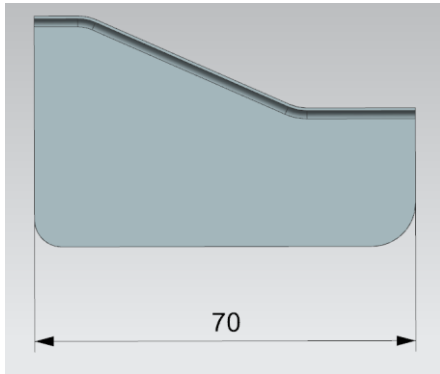
Величина длины развертки $L = 8,2$ мм. (см.Глава 2, Рисунок 2.37) рассчитанной аналитически по предлагаемой методике и длины развертки на натурной детали $L_{\text{нат}} = 8,1185$ мм. (см.Рисунок 4.25) различаются на $0,994\%$ так что результаты можно считать идентичными.

Величина длины развертки $L = 8,064$ мм. (см.Глава 3, Рисунок 3.34) рассчитанной по методу конечных элементов и длины развертки на натурной детали $L_{\text{нат}} = 8,1185$ мм. (см.Рисунок 4.25) различаются на $0,676\%$ так что результаты можно считать идентичными.

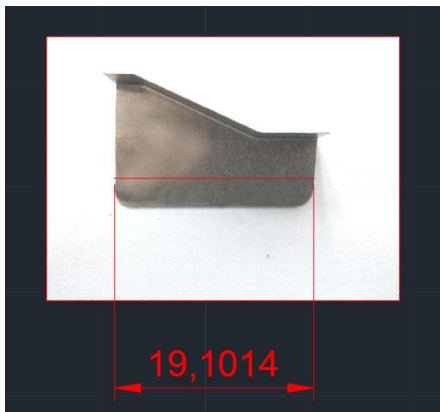
Проанализируем деталь после второго перехода (см.Рисунок 4.26).



а)



б)



в)

а) фото детали после второго перехода; б) геометрическая модель детали с габаритным размером; в) габаритный размер детали на фото.

Рисунок 4.26– деталь №3 после второго перехода

В результате имеем следующие данные из формул (4.9) и (4.10):

- $H = 19,1014$ мм.;
- $d = 18,340258$ мм.;
- $h = 80$ мм.;
- $f = 4$ мм.

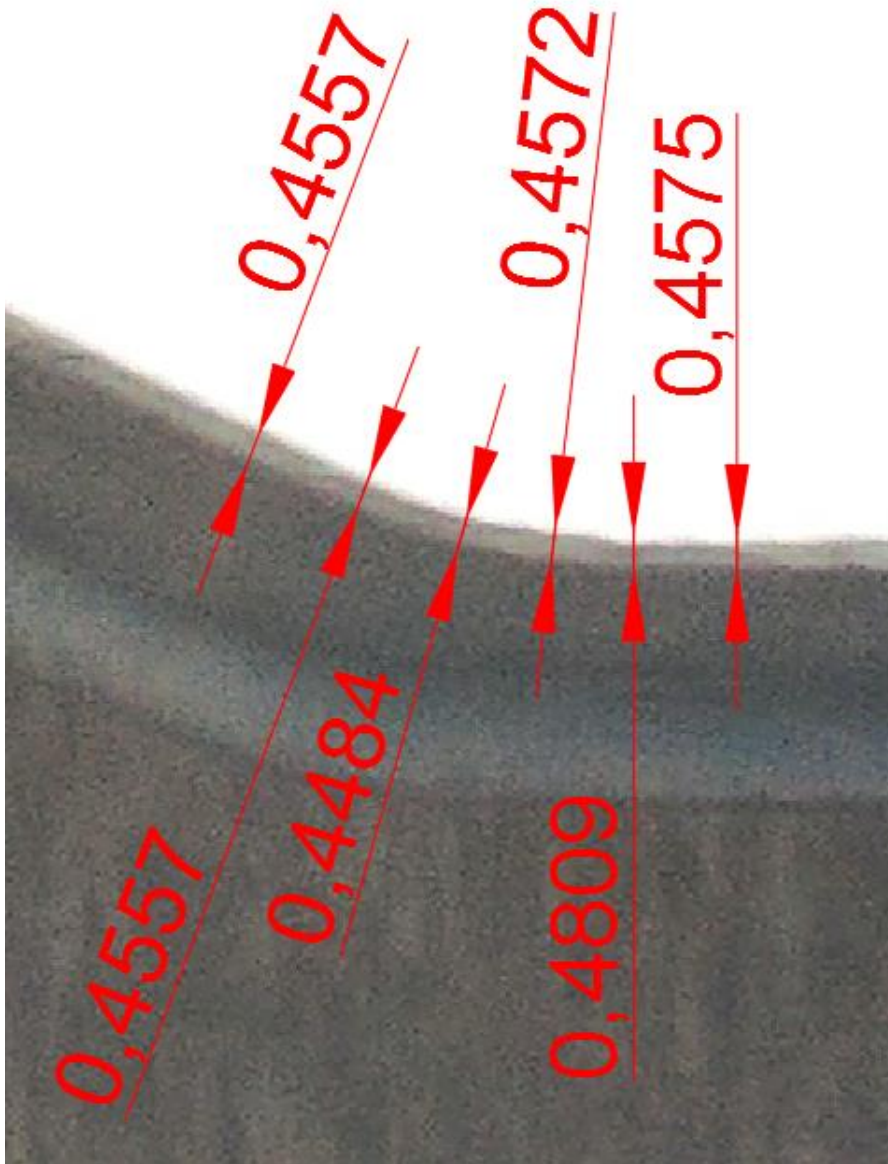


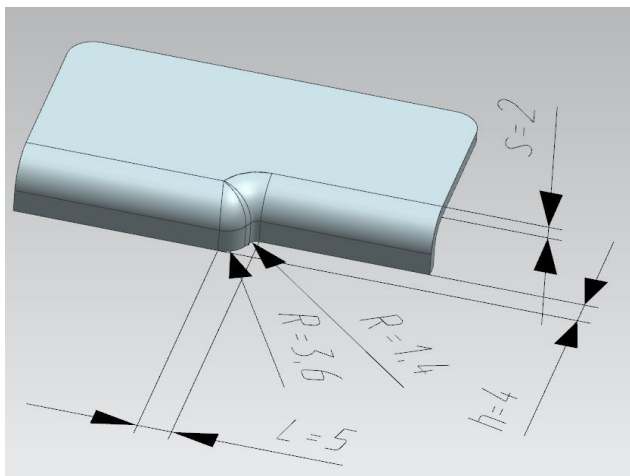
Рисунок 4.27 – Распределение толщин на детали №3 в районе подсечки

Разница между $s_{i(min)} = 0,441$ мм. (см.Глава 2, Формула (2.105) рассчитанной аналитически по предлагаемой методике и натурным экспериментом $s_{нат(min)} = 0,4484$ мм. (см.Рисунок 4.27) составляет 1,678 процента так что результаты можно считать идентичными.

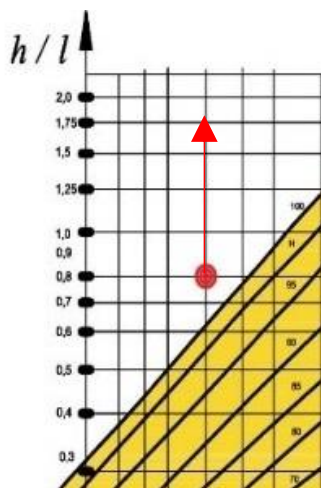
Разница между $s_{мин} = 0,445$ мм. (см.Глава 3, см.Рисунок 3.39) рассчитанной по методу конечных элементов и натурным экспериментом $s_{нат(min)} = 0,4484$ мм. (см.Рисунок 4.27) составляет 0,764 процента так что результаты можно считать идентичными

4.3. Анализ деталей №2 при изменении параметров номограммы

Натурные эксперименты подтвердили сходимость результатов предлагаемой методики с изготовленными деталями. Теперь используя данную методику можно проанализировать что будет при изменении параметров на номограмме (см.Глава 2, Рисунок 2.1) при движении в разные стороны уходя дальше в зоны, подсечек, которые не могут быть получены. Начнем с детали №2. Проанализируем что будет при увеличении параметра h/l (см.Рисунок 4.28).



а)



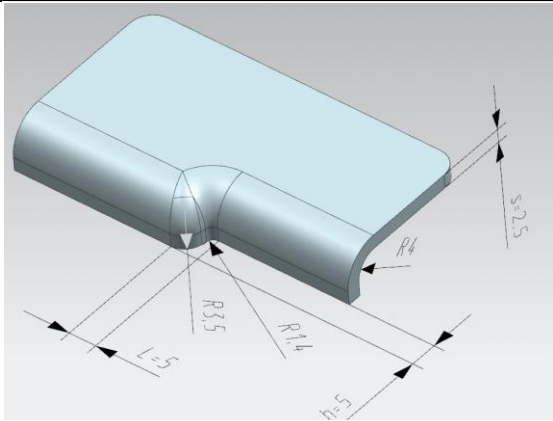
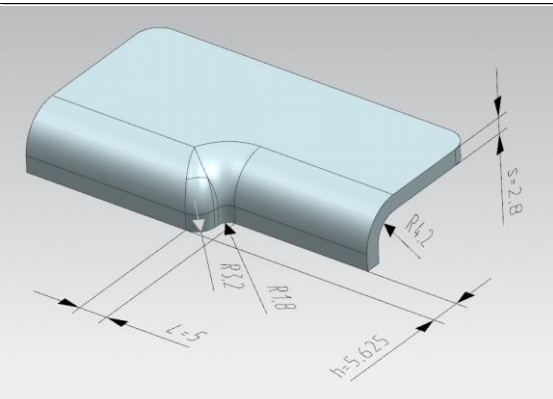
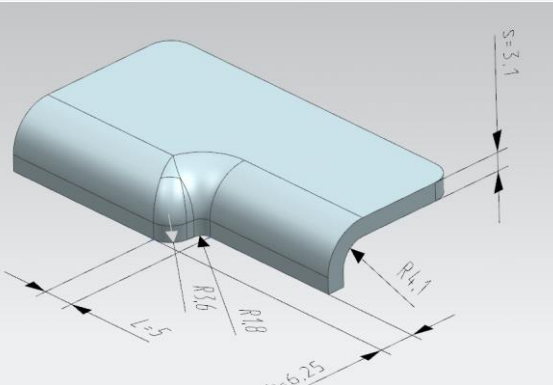
б)

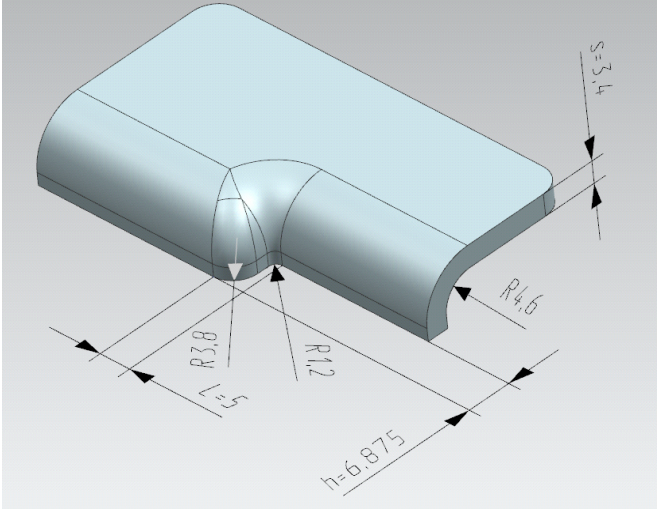
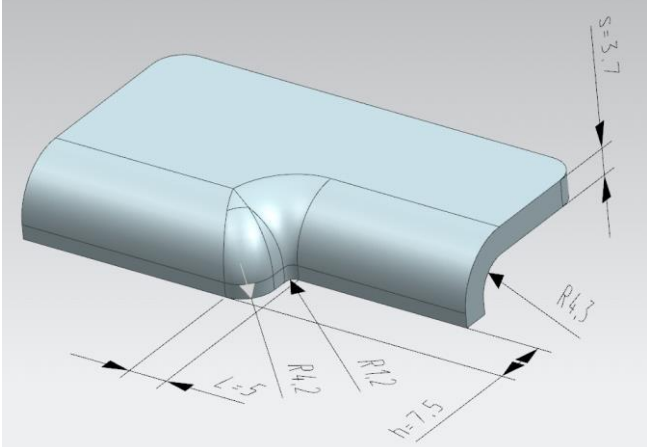
а) параметры детали №2; б) исходное положение на номограмме и вектор изменения параметров.

Рисунок 4.28 – Увеличение параметра h/l

Для этого были построены электронные модели деталей с разными h/l (см. Таблица 4.4) относительно исходного положения на номограмме (см. Глава 2, Рисунок 2.1).

Таблица 4.4 – Детали с разными h/l

№	Деталь	Величина разными h/l
2		1
3		1,125
4		1,25

№	Деталь	Величина разными h/l
5		1,375
6		1,5

Исходя из расчетов по предлагаемой методике (см.Глава 2, раздел 2.3) был построен график зависимости требуемого давления от площади контакта подвижного прижима с эластичной средой (в качестве детали №1 для графика использовалась деталь по которой проводился натурный эксперимент) (см.Рисунок 4.29).

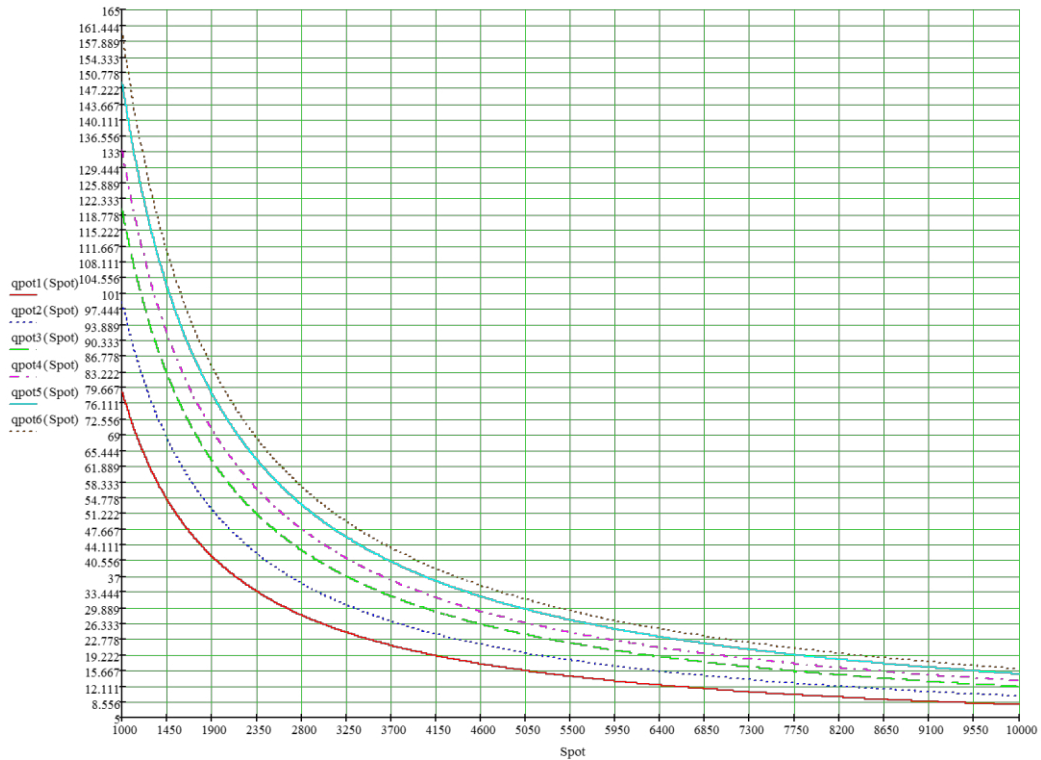


Рисунок 4.29 – Графики требуемого давления для 6 деталей

Как видно из графика (см.Рисунок 4.29) чем больше параметр h/l тем выше смещается график вверх и тем больше нужно давление для формообразования.

Также проанализированы изменения от h/l следующих параметров:

- деформации по толщине (ϵ);
- полной деформации ($\epsilon_{пол}$);
- напряжение возникающие при формообразовании подсечки ($\sigma_{пол}$).

В результате по графикам (см.Рисунок 4.30, Рисунок 4.31, Рисунок 4.32) видно изменения этих величин.

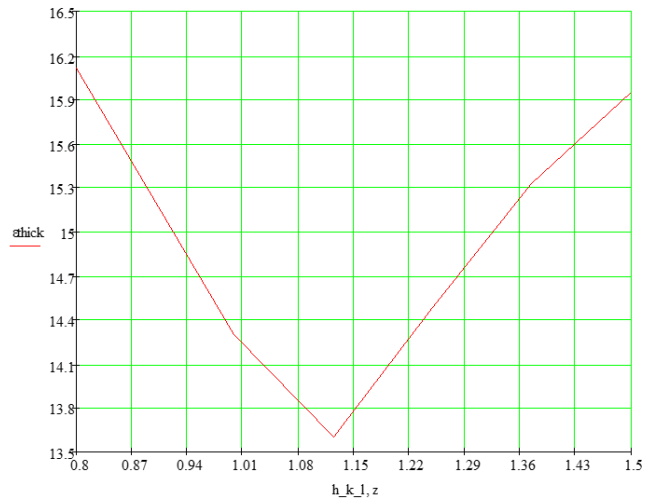


Рисунок 4.30 – Изменение деформации по толщине

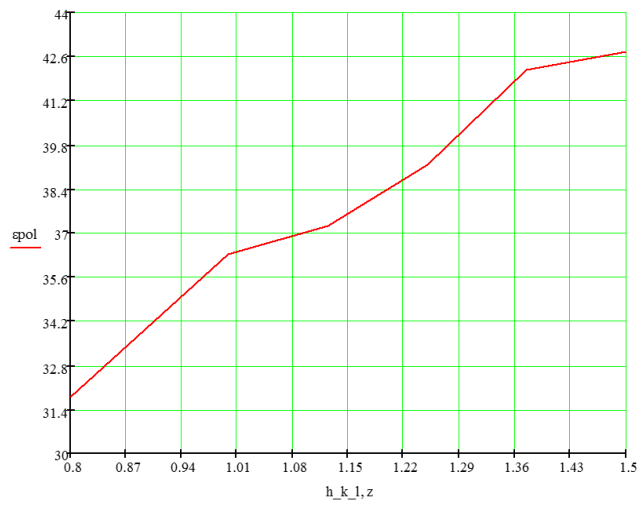


Рисунок 4.31 – Изменение полной деформации

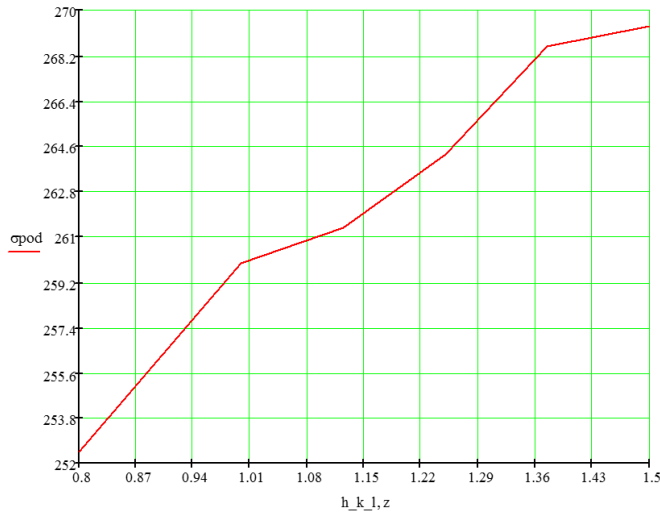


Рисунок 4.32 – Изменение напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для того чтобы вывести зависимость изменения данных величин от h/l воспользуемся методом наименьших квадратов [34]. Для интерполяции величин $\sigma_{\text{пол}}$ и $\varepsilon_{\text{пол}}$ использовалась степенная функция вида $y=a \cdot x^b+c$. Для величины ε использовалась аппроксимация в виде линейной комбинации функции $\frac{a}{x+0,1}$; $b \cdot x^2$; $c \cdot e^x$ [49]. В результате получим:

$$- \varepsilon_{\text{апрок}} = \frac{22,512}{(h/l)+0,1} + 20,733 \cdot (h/l)^2 - 9,953 \cdot e^{(h/l)} \quad (\text{см.Рисунок 4.33});$$

$$- \varepsilon_{\text{пол_интер}} = 1565810,548 \cdot (h/l)^{0,0000113} - 1565774,778 \quad (\text{см.Рисунок 4.34});$$

$$- \sigma_{\text{под_интер}} = 1565923,609 \cdot (h/l)^{0,0000173} - 1565664,759 \quad (\text{см.Рисунок 4.35}).$$

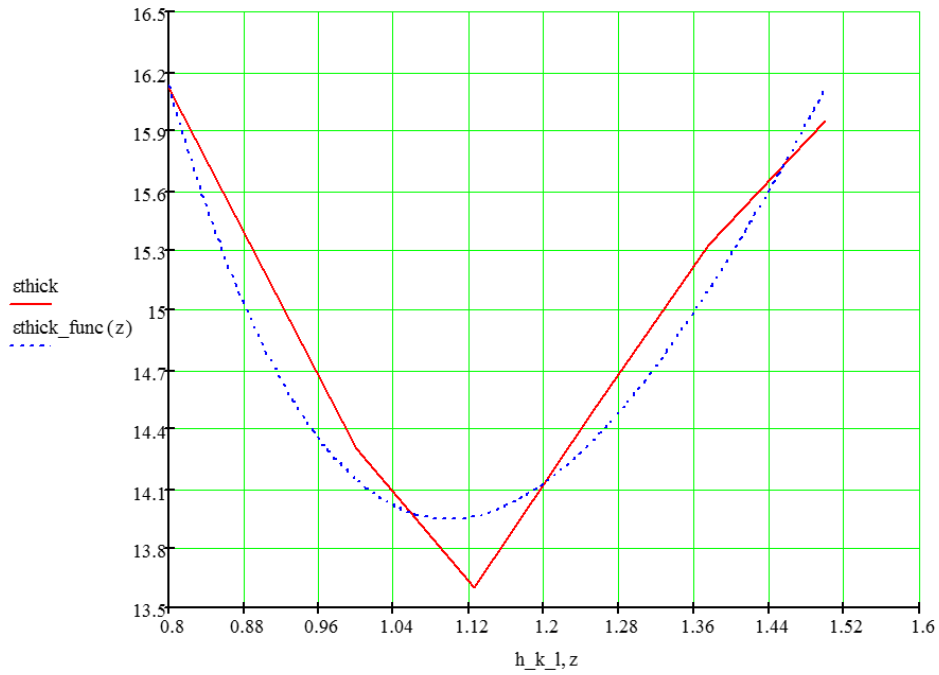


Рисунок 4.33 – Функция изменения деформации по толщине

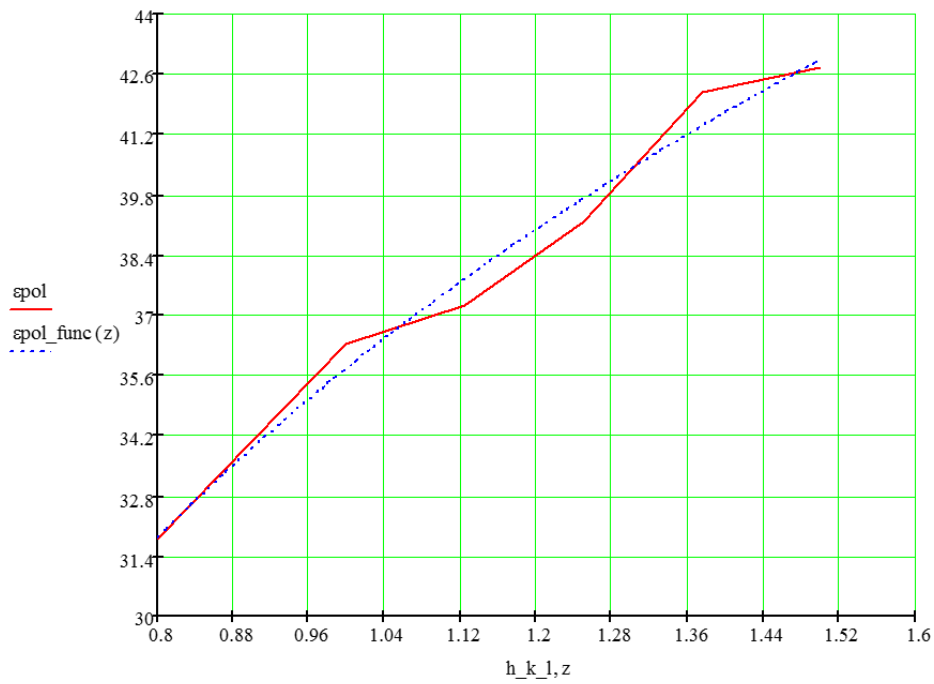


Рисунок 4.34 – Функция изменения полной деформации

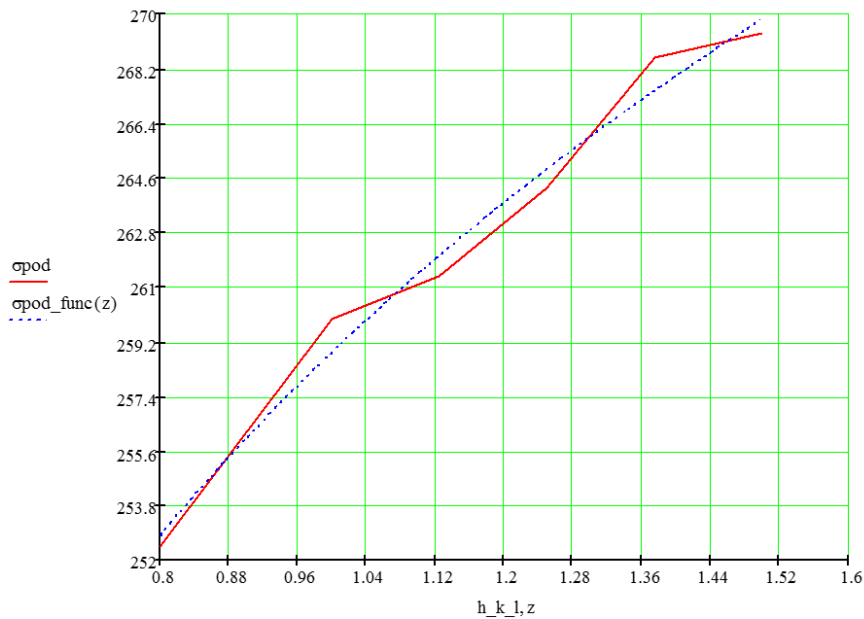


Рисунок 4.35 – Функция изменения напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для оценки разницы между значениями выведенных функции и реальными можно воспользоваться критерием корреляции Пирсона или коэффициентом Пирсона [60]. Этот коэффициент основан на методе параметрической статистики, позволяющий определить наличие или отсутствие линейной связи между двумя количественными показателями, а также оценить ее тесноту и статистическую значимость. Другими словами, критерий корреляции Пирсона позволяет определить, есть ли линейная связь между изменениями значений двух переменных. Данный коэффициент вычисляется по формуле (4.12):

$$r_{yy_1} = \frac{\overline{yy_1} - \bar{y} \cdot \bar{y_1}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4.12)$$

$$\text{Где } \bar{y} = \frac{\sum_0^n y_i}{n};$$

$$\bar{y_1} = \frac{\sum_0^n y_{1i}}{n};$$

$$\overline{yy_1} = \frac{\sum_0^n y_i \cdot y_{1i}}{n};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_0^n y_i^2}{n} - \bar{y}^2};$$

$$\sigma_{y_1} = \sqrt{\frac{\sum_0^n y_{1i}^2}{n} - \bar{y_1}^2};$$

В результате имеем для функций (см.Рисунок 4.33, Рисунок 4.34,Рисунок 4.35):

$$- r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}} = 0,9739;$$

$$- r_{\varepsilon_{\text{пол}}\varepsilon_{\text{пол_интер}}} = 0,9903;$$

$$- r_{\sigma_{\text{под}}\sigma_{\text{под_интер}}} = 0,9909.$$

Для оценки корреляционной связи воспользуемся таблицей Чеддока (см.Таблица 4.5) [39, 57].

Таблица 4.5 – Таблица Чеддока

Абсолютное значение r_{y_1}	Теснота (сила) корреляционной связи
менее 0.3	слабая
от 0.3 до 0.5	умеренная
от 0.5 до 0.7	заметная
от 0.7 до 0.9	высокая
более 0.9	весьма высокая

В нашем случае $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}}$, $r_{\varepsilon_{\text{пол}}\varepsilon_{\text{пол_интер}}}$, $r_{\sigma_{\text{под}}\sigma_{\text{под_интер}}}$ больше 0,9 что говорит о большей силе корреляционной связи т.е различие между функциями минимальны.

Для примера если бы для величины ε использовалась аппроксимация в виде линейной комбинации функции $a \cdot x^{-5}$; $b \cdot x^{-7}$; $c \cdot tg(x)$. То получается следующие выражение (см.Рисунок 4.36, Формула (4.13):

$$\varepsilon_{\text{апрок}} = 36,152 \cdot (h/l)^{-5} - 20,075 \cdot (h/l)^{-7} + 1,036 \cdot tg(h/l) \quad (4.13)$$

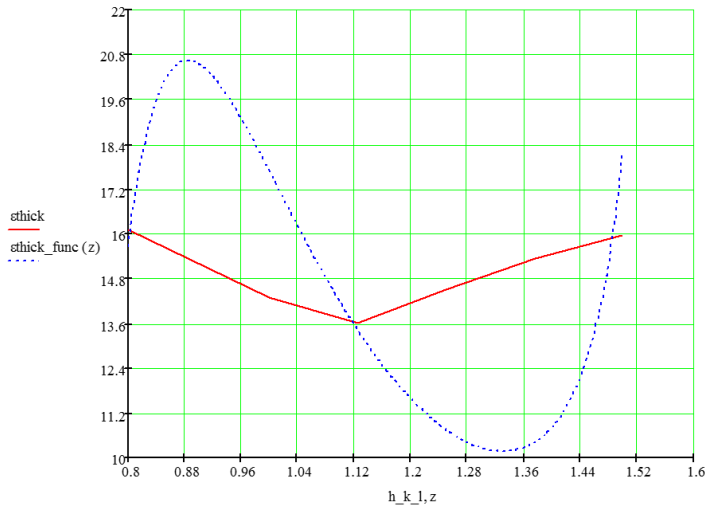


Рисунок 4.36 – Функция изменение деформации по толщине $\varepsilon_{\text{апрок}} = 36,152 \cdot (h/l)^{-5} - 20,075 \cdot (h/l)^{-7} + 1,036 \cdot \text{tg}(h/l)$

Коэффициент Пирсона $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}}$ тогда равен 0,2788 что меньше 0,3 и свидетельствует о очень слабой силе корреляционной связи т.е различие между функциями довольно существенны.

Проанализируем что будет при уменьшении параметра h/s (см.Рисунок 4.37).

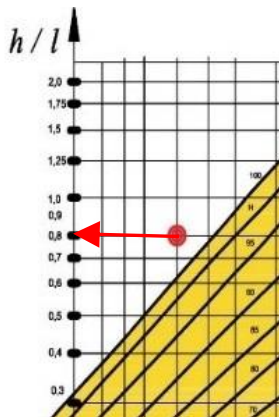
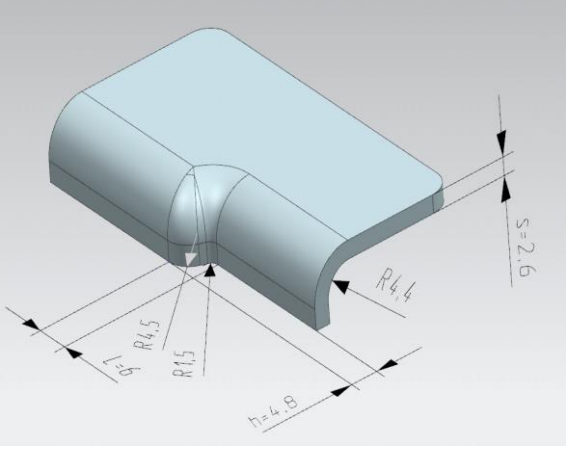
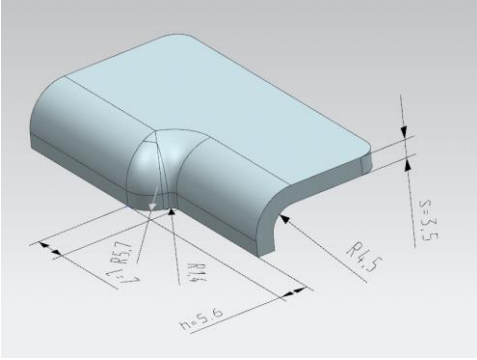
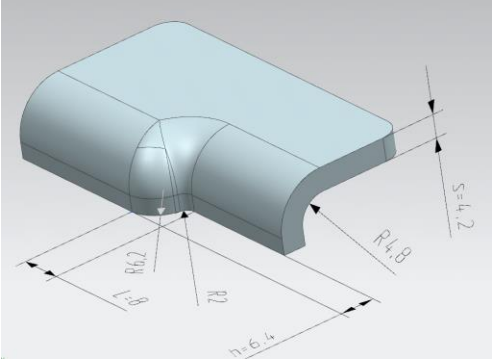
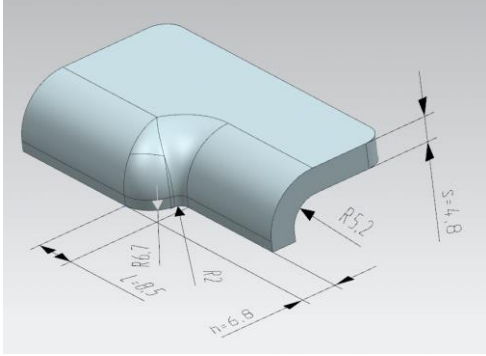
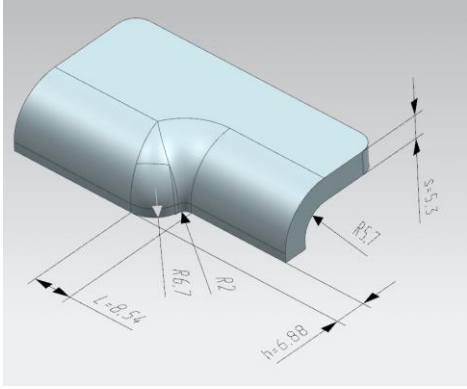


Рисунок 4.37 – Исходное положение на номограмме и вектор изменения параметров h/s

Для этого были построены электронные модели деталей с разными h/s (см.Таблица 4.6)

Таблица 4.6 – Детали с разными h/s

№	Деталь	Величина разными h/s
2		1,8
3		1,6
4		1,5

№	Деталь	Величина разными h/s
5		1,4
6		1,3

Исходя из расчетов по предлагаемой методике (см.Глава 2, раздел 2.3) был построен график зависимости требуемого давления от площади контакта подвижного прижима с эластичной средой (в качестве детали №1 использовалась деталь по которой проводился натурный эксперимент) (см.Рисунок 4.38).

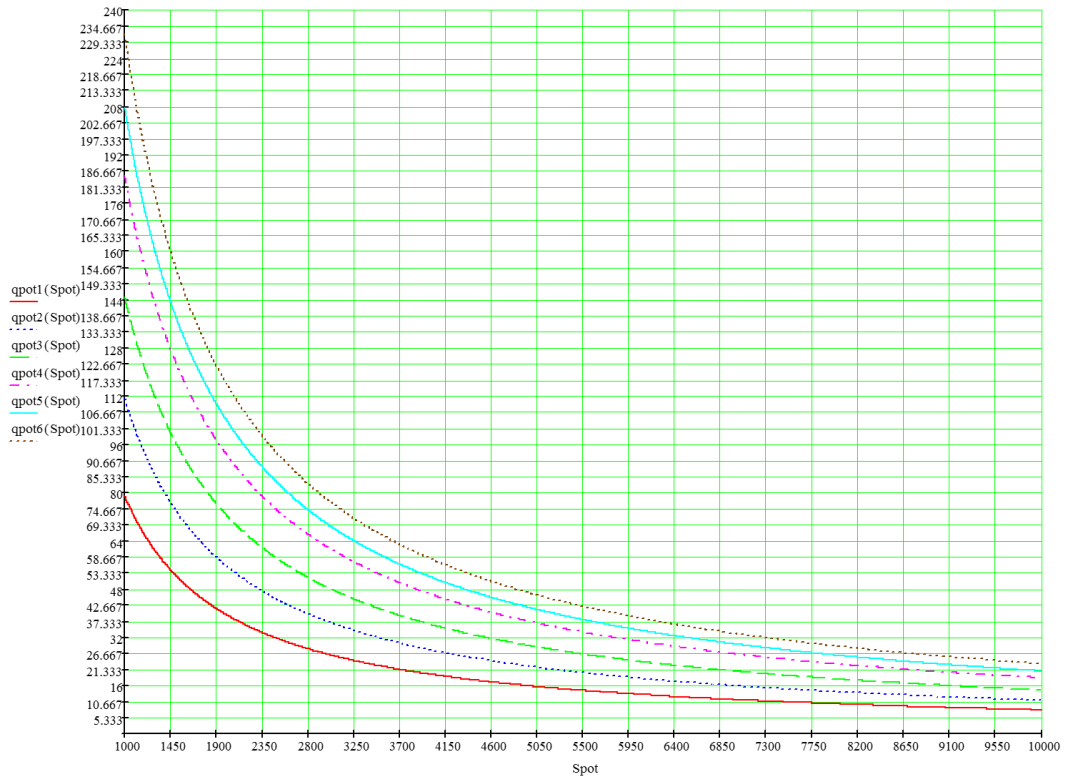


Рисунок 4.38 –Графики потребного давления для 6 деталей

Как видно из графика (см.Рисунок 4.38) чем меньше параметр h/s тем выше смещается график вверх и тем больше нужно давление для формообразования.

Также проанализировано изменение от h/s следующих величин:

- деформации по толщине (ϵ);
- полной деформации ($\epsilon_{\text{пол}}$);
- напряжение возникающие при формообразовании подсечки ($\sigma_{\text{пол}}$).

В результате по графикам видно изменения этих величин (см.Рисунок 4.39, Рисунок 4.40, Рисунок 4.41).

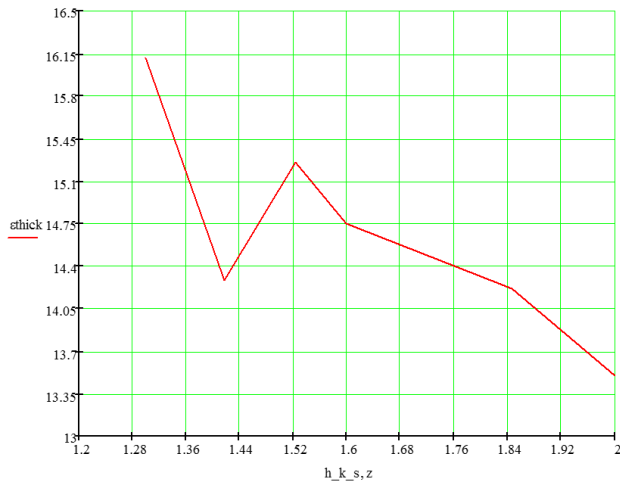


Рисунок 4.39 – Изменение деформации по толщине

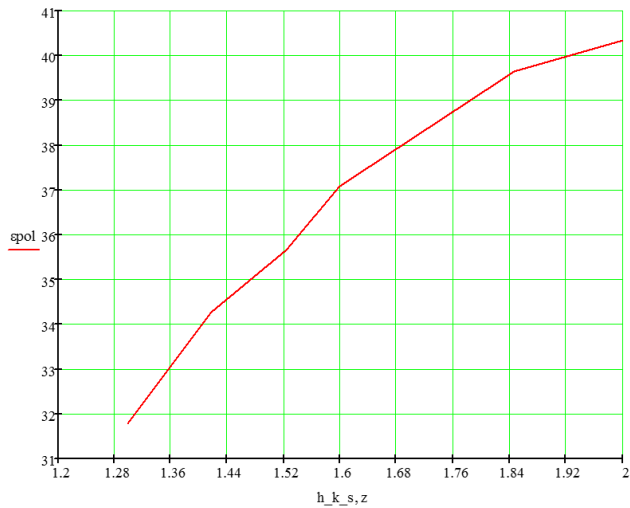


Рисунок 4.40 – Изменение полной деформации

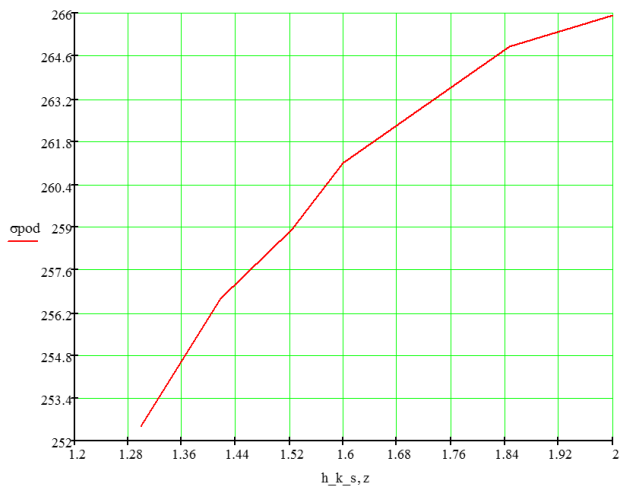


Рисунок 4.41 – Изменение напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для того чтобы вывести зависимость изменения данных величин от h/s воспользуемся методом наименьших квадратов [34]. Для интерполяции величин $\sigma_{\text{пол}}$ и $\varepsilon_{\text{пол}}$ использовалась степенная функция вида $y=a \cdot x^b+c$. Для величины ε использовалась аппроксимация в виде линейной комбинации функции $a \cdot \cos(x)$; $b \cdot \sin(x)$; $c \cdot e^x$ [49]. В результате получим:

– $\varepsilon_{\text{апрок}} = 10,592 \cdot \cos(h/s) + 7,408 \cdot \sin(h/s) + 1,533 \cdot e^{(h/s)}$ (см.Рисунок 4.42);

– $\varepsilon_{\text{пол_интер}} = 1558669,617 \cdot (h/s)^{0,0000127} - 1558642,413$ (см.Рисунок 4.43);

– $\sigma_{\text{под_интер}} = 1558786,704 \cdot (h/s)^{0,0000173} - 1558541,179$ (см.Рисунок 4.44).

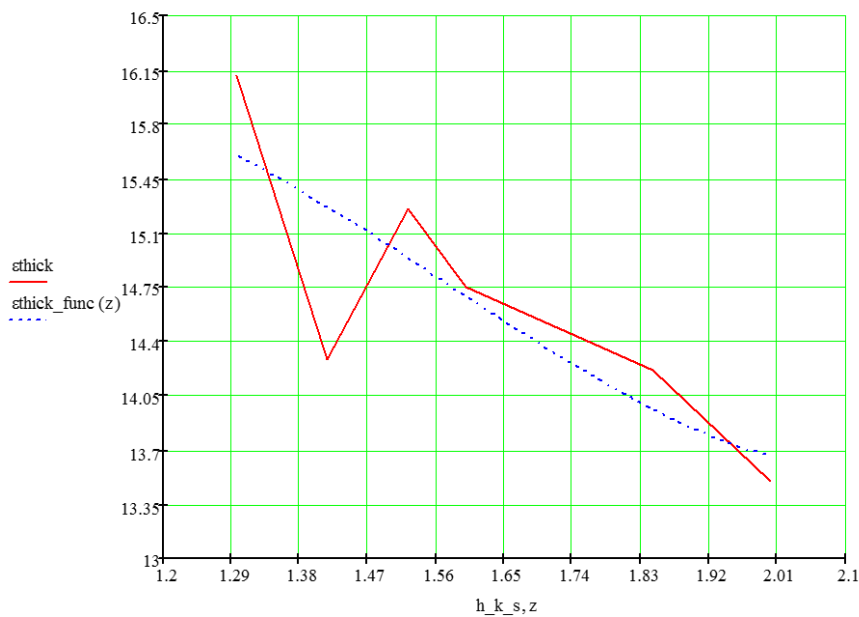


Рисунок 4.42 – Функция изменения деформации по толщине

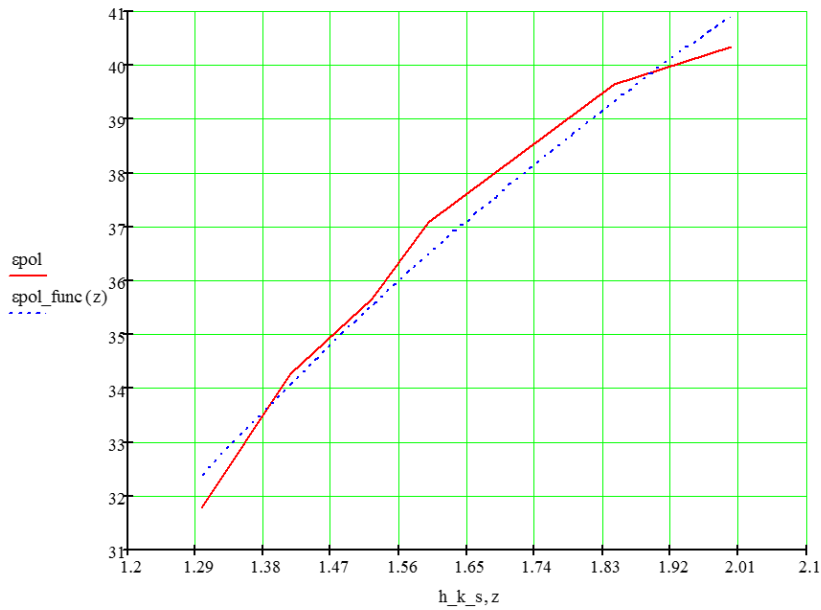


Рисунок 4.43 – Функция изменения полной деформации

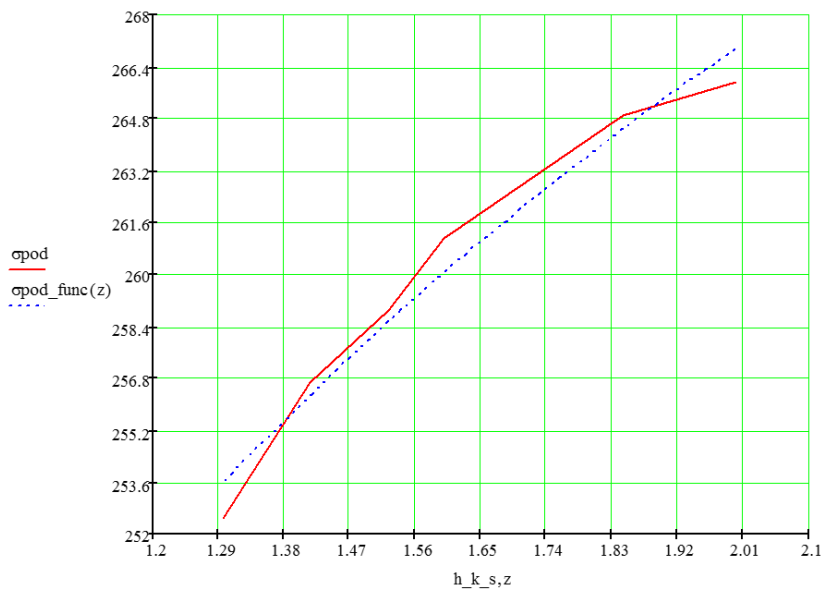


Рисунок 4.44 – Функция изменения напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для оценки разницы между значениями выведенных функции и реальными можно воспользоваться критерием корреляции Пирсона или коэффициентом Пирсона [60]. В результате имеем для функций:

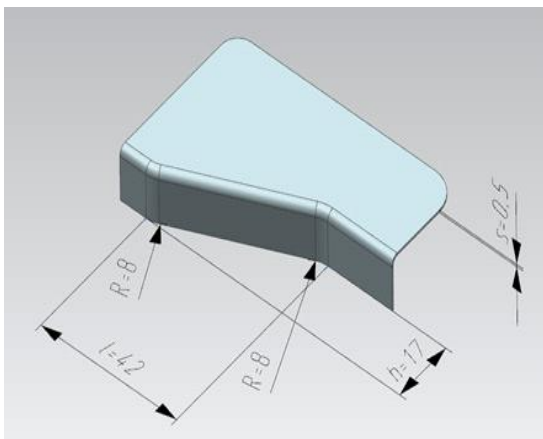
- $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}} = 0,812;$
- $r_{\varepsilon_{\text{пол}}\varepsilon_{\text{пол_интер}}} = 0,9888;$

$$- r_{\sigma_{\text{под}} \sigma_{\text{под_интер}}} = 0,9848.$$

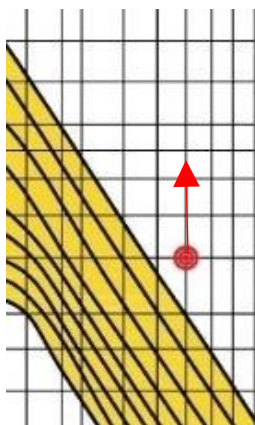
Для оценки корреляционной связи воспользуемся таблицей Чеддока (см. Таблица 4.5) [39, 57]. В нашем случае $r_{\varepsilon_{\text{пол}} \varepsilon_{\text{пол_интер}}}$, $r_{\sigma_{\text{под}} \sigma_{\text{под_интер}}}$ больше 0,9 что говорит о большей силе корреляционной связи т.е различие между функциями минимальны. Значение $r_{\varepsilon_{\text{апрок}}}$ больше 0,8 что говорит просто о высокой силе корреляционной связи, различие между функциями незначительны.

4.4. Анализ деталей №3 при изменении параметров номограммы

Проанализируем что будет при увеличении параметра h/l на детали №3 (см. Рисунок 4.45).



а)



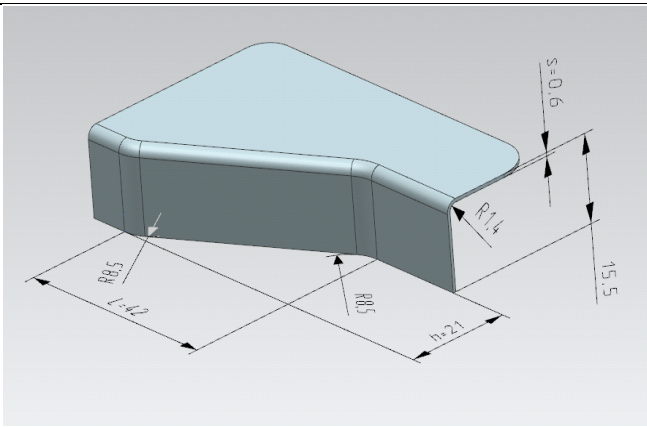
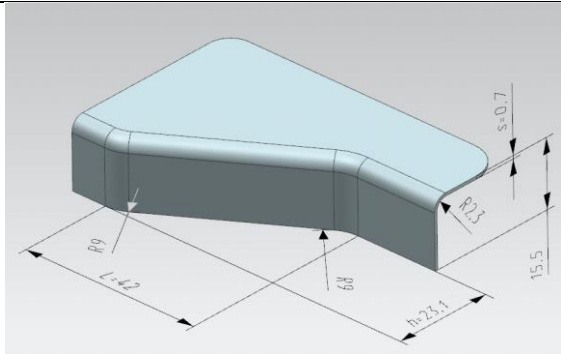
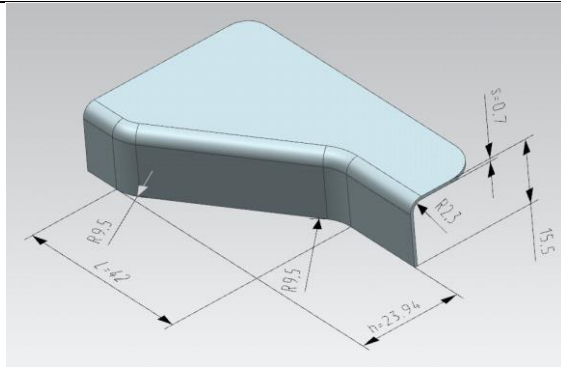
б)

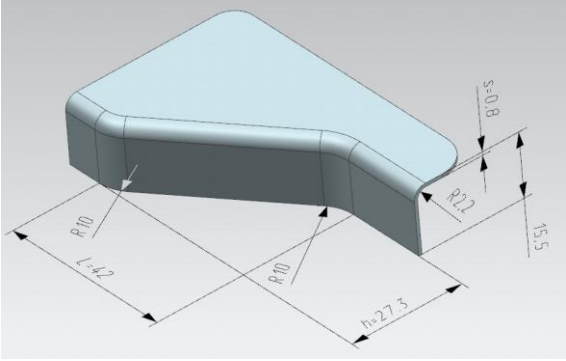
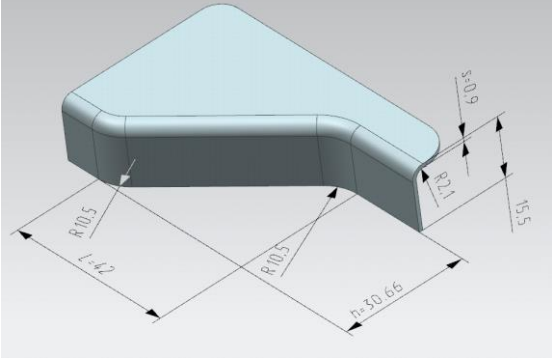
а) параметры детали №2; б) исходное положение на номограмме и вектор изменения параметров.

Рисунок 4.45 – Увеличение параметра h/l

Для этого были построены электронные модели деталей с разными h/l .

Таблица 4.7 – Детали с разными h/l

№	Деталь	Величина разными h/l
2	 <p>3D CAD model of a part with dimensions: $L=42$, $h=21$, $R8.5$, $R1.4$, $s=0.6$, and a vertical dimension of 15.5.</p>	0,5
3	 <p>3D CAD model of a part with dimensions: $L=42$, $h=23.1$, $R9$, $R2.3$, $s=0.7$, and a vertical dimension of 15.5.</p>	0,55
4	 <p>3D CAD model of a part with dimensions: $L=42$, $h=23.94$, $R9.5$, $R2.3$, $s=0.7$, and a vertical dimension of 15.5.</p>	0,57

№	Деталь	Величина разными h/l
5		0,65
6		0,73

Исходя из расчетов по предлагаемой методике (см.Глава 2, раздел 2.4) был построен график зависимости требуемого давления от площади контакта подвижного прижима с эластичной средой (в качестве детали №1 использовалась деталь по которой проводился натурный эксперимент) (см.Рисунок 4.46).

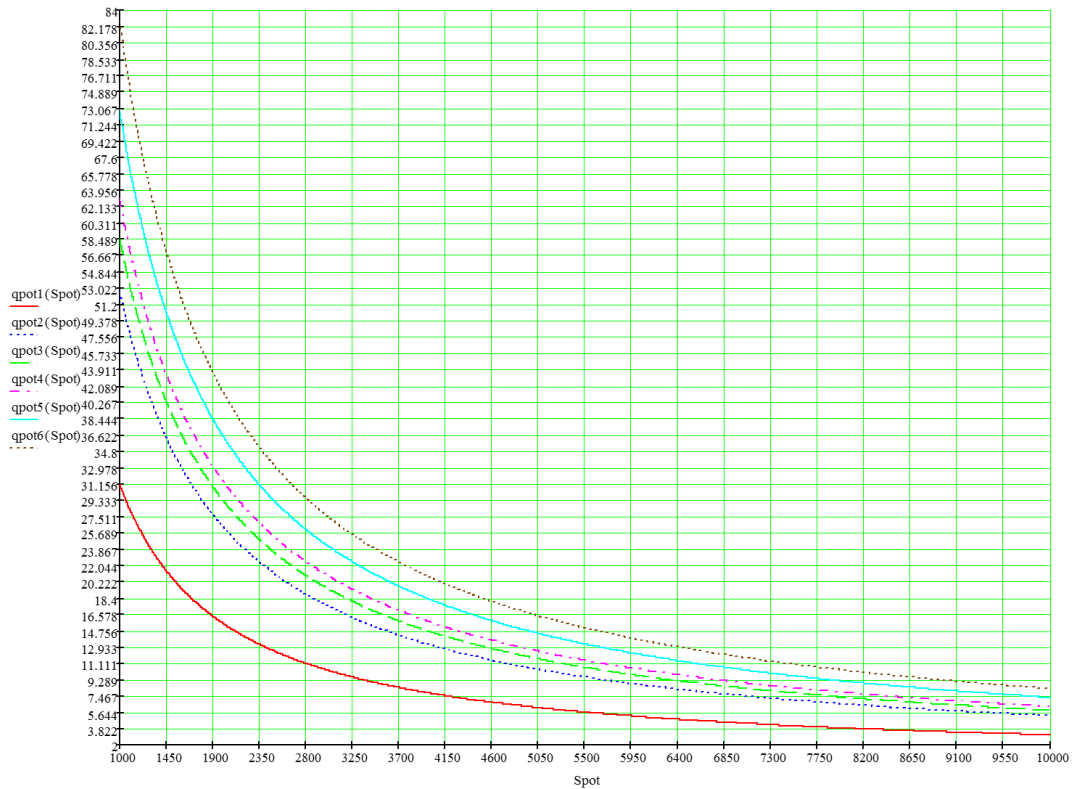


Рисунок 4.46 – Графики требуемого давления для 6 деталей

Как видно из графика (см.Рисунок 4.46) чем больше параметр h/l тем выше смещается график и тем больше нужно давление для формообразования.

Также проанализирована изменение от h/l относительно:

- деформации по толщине (ϵ);
- деформации посадки гофра ($\epsilon_{\text{пол}}$);
- напряжение возникающие при формообразовании подсечки ($\sigma_{\text{пол}}$).

В результате по графикам видно изменения этих величин (см.Рисунок 4.47, Рисунок 4.48, Рисунок 4.49).

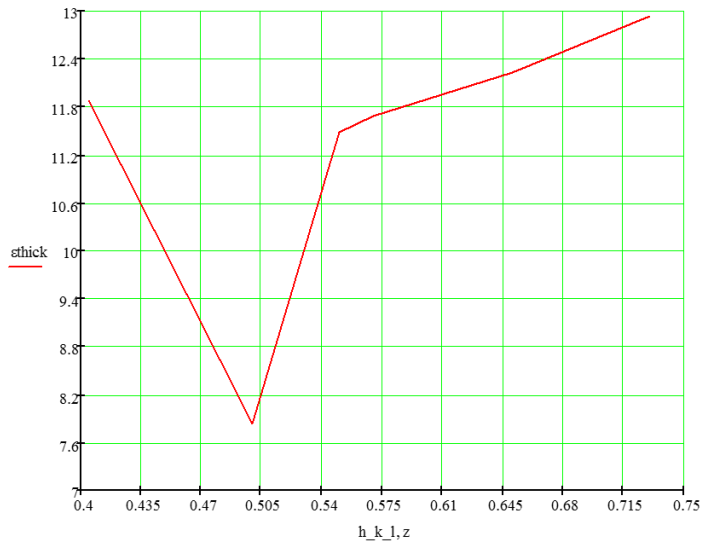


Рисунок 4.47 – Изменение деформации по толщине

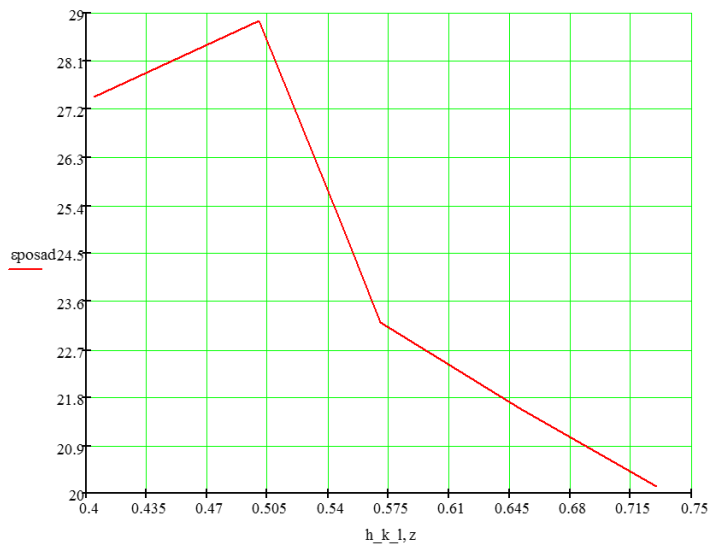


Рисунок 4.48 – Изменение полной деформации

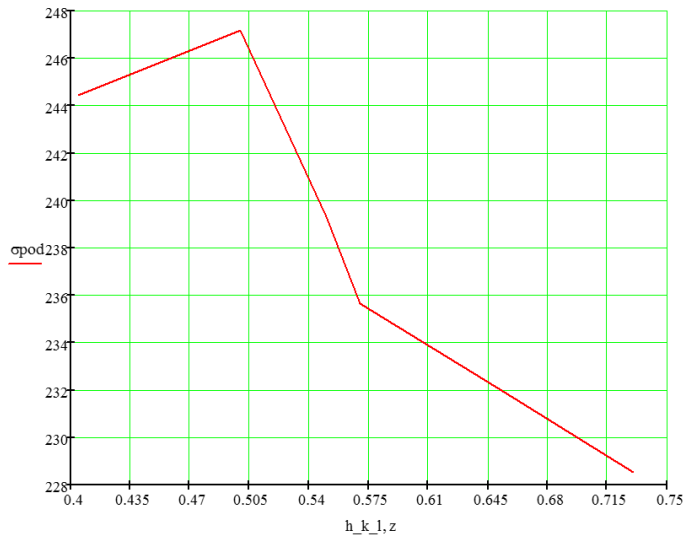


Рисунок 4.49 – Изменение напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для того чтобы вывести зависимость изменения данных величин от h/l воспользуемся методом наименьших квадратов [34]. Для интерполяции величин $\sigma_{\text{пол}}$ и $\varepsilon_{\text{пол}}$ использовалась степенная функция вида $y=a \cdot x^b+c$. Для величины ε использовалась аппроксимация в виде линейной комбинации функции $a \cdot \operatorname{tg}(x)$; $b \cdot x^2$; $c \cdot e^x$ [49]. В результате получим:

$$- \varepsilon_{\text{апрок}} = -335,104 \cdot \operatorname{tg}(h/l) + 321,876 \cdot (h/l)^2 + 68,318 \cdot e^{(h/l)}$$

(см.Рисунок 4.50);

$$- \varepsilon_{\text{посад}_\text{интер}} = 1558707,014 \cdot (h/l)^{-0,0000093} - 1558691,125 \text{ (см.Рисунок 4.51);}$$

$$- \sigma_{\text{под}_\text{интер}} = 1558816,421 \cdot (h/l)^{-0,00002} - 1558596,749 \text{ (см.Рисунок 4.52);}$$

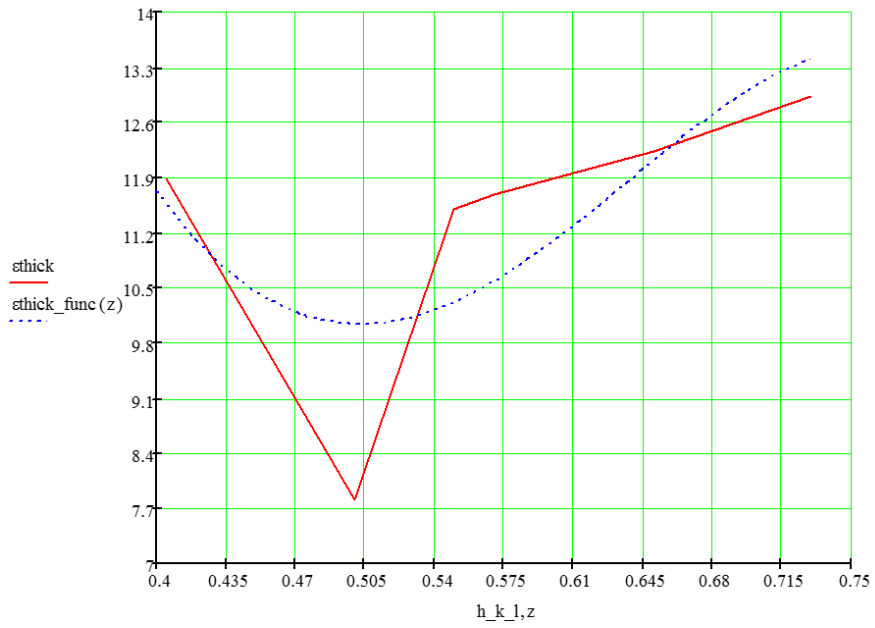


Рисунок 4.50 – Функция изменения деформации по толщине

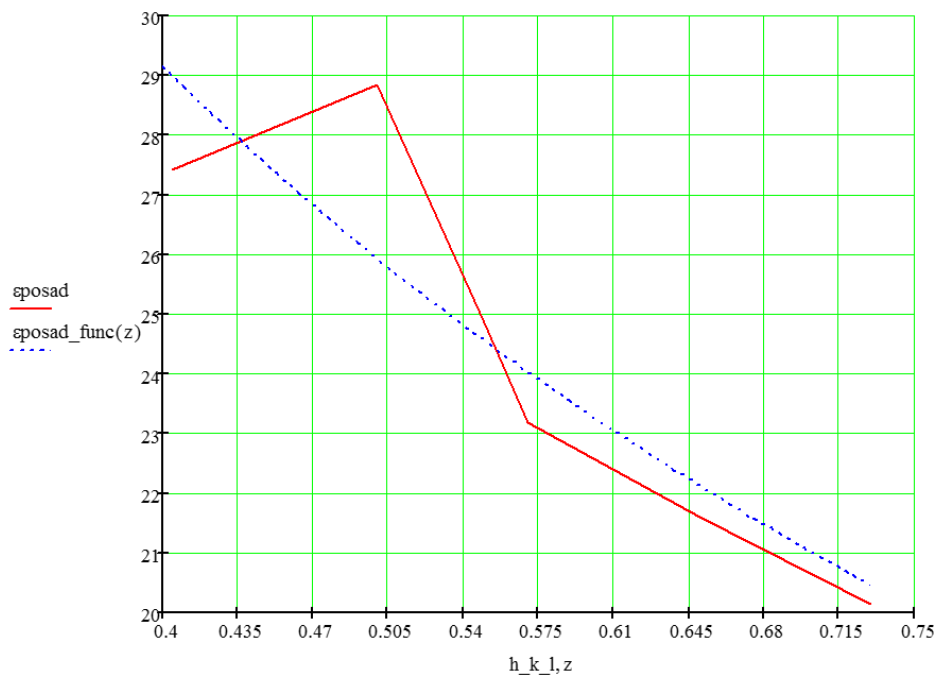


Рисунок 4.51 – Функция изменения полной деформации

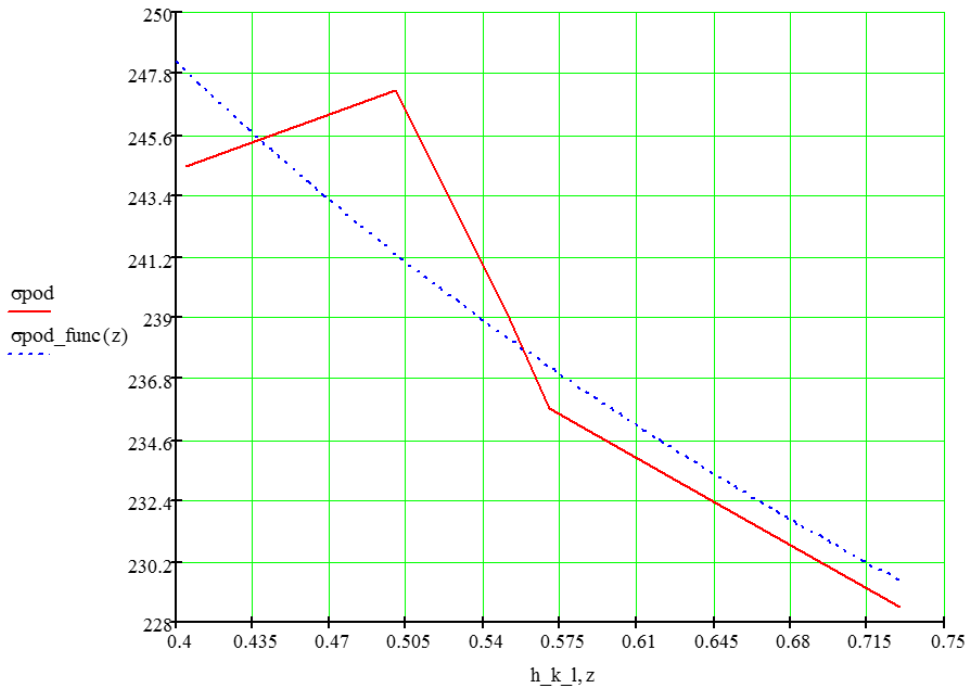


Рисунок 4.52 – Функция изменения напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для оценки разницы между значениями выведенных функции и реальными можно воспользоваться критерием корреляции Пирсона или коэффициентом Пирсона [60]. В результате имеем для функций:

- $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}} = 0,7194;$
- $r_{\varepsilon_{\text{посад}}\varepsilon_{\text{посад_интер}}} = 0,886;$
- $r_{\sigma_{\text{под}}\sigma_{\text{под_интер}}} = 0,8941.$

Для оценки корреляционной связи воспользуемся таблицей Чеддока (см.Таблица 4.5) [39, 57].В нашем случае $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}}, r_{\varepsilon_{\text{посад}}\varepsilon_{\text{посад_интер}}}, r_{\sigma_{\text{под}}\sigma_{\text{под_интер}}}$ больше 0,7 что говорит о высокой силе корреляционной связи т.е различие между функциями не значительны.

Проанализируем что будет при увеличении параметра h/s (см.Рисунок 4.53).

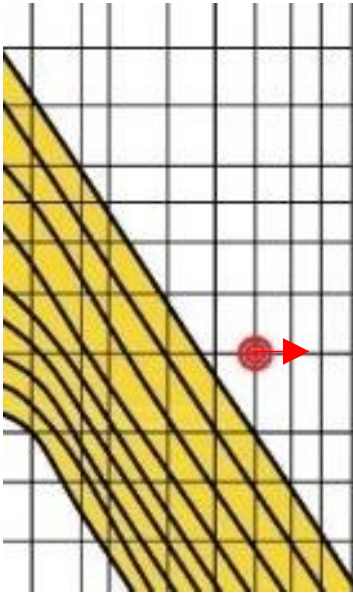
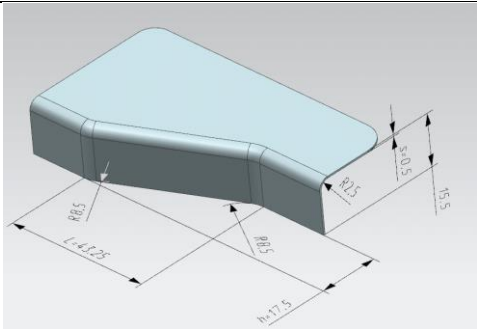
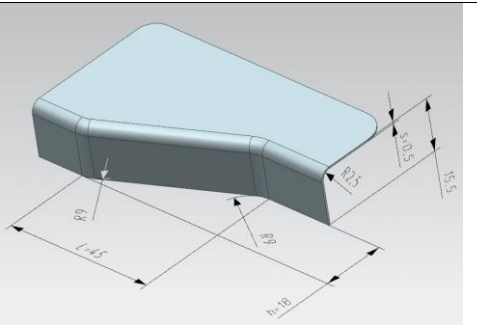
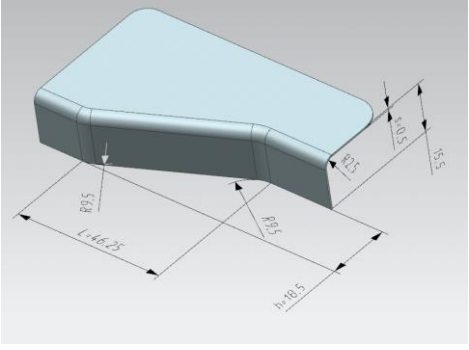
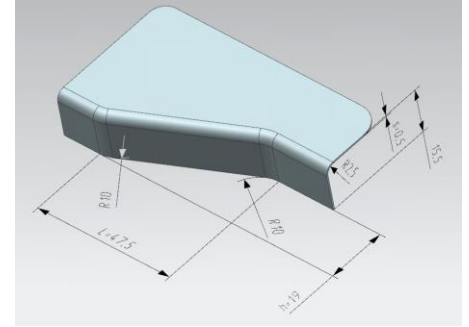
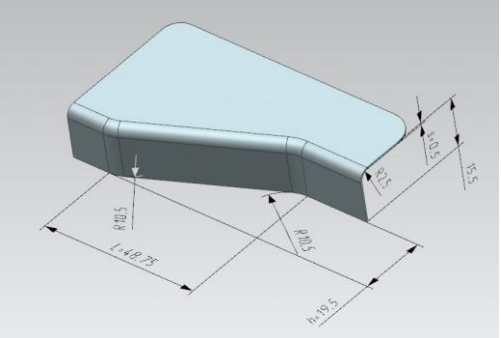


Рисунок 4.53 – Исходное положение на номограмме и вектор изменения параметров h/s

Для этого были построены электронные модели деталей с разными h/s (см.).

Таблица 4.8 – Детали с разными h/s

№	Деталь	Величина разными h/s
2		35
3		36

№	Деталь	Величина разными h/s
4		37
5		38
6		39

Исходя из расчетов по предлагаемой методике (см.Глава 2, раздел 2.4) был построен график зависимости требуемого давления от площади контакта подвижного прижима с эластичной средой (в качестве детали №1 использовалась деталь по которой проводился натурный эксперимент) (см.).

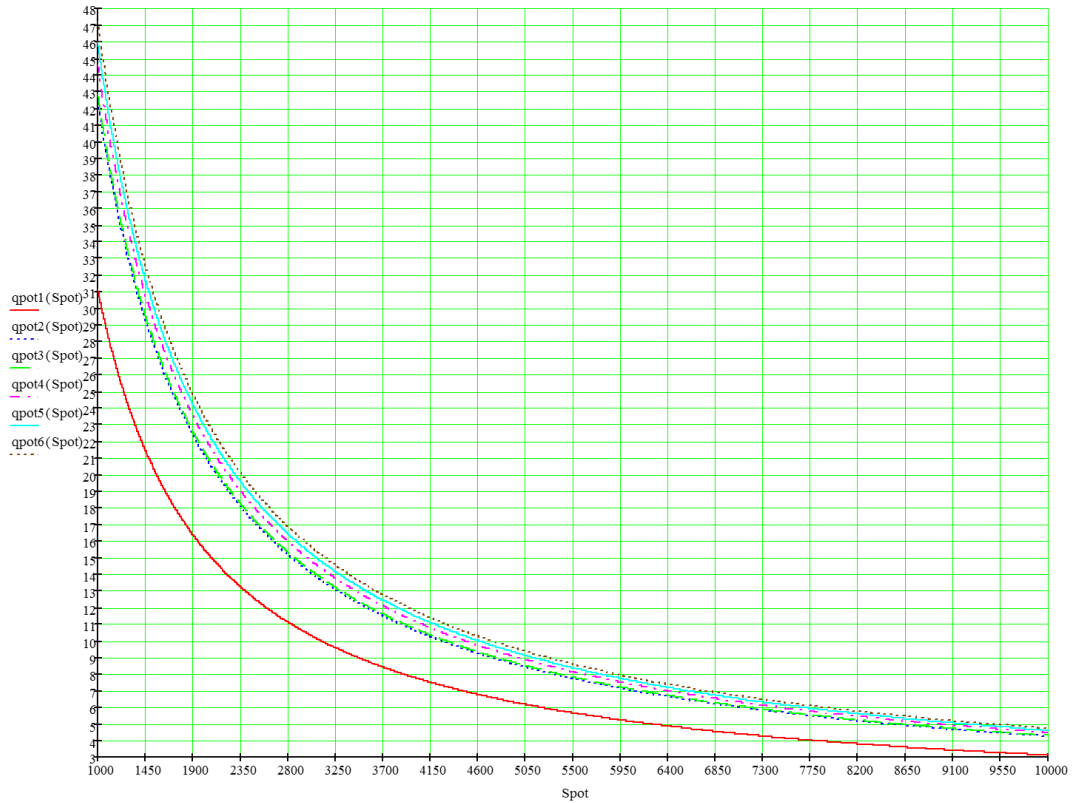


Рисунок 4.54 – Графики требуемого давления для 6 деталей

Как видно из графика (см.Рисунок 4.54) чем меньше параметр h/s тем выше смещается график и тем больше нужно давление для формообразования.

Также проанализирована изменение от h/s :

- деформации по толщине (ϵ);
- полной деформации ($\epsilon_{\text{пол}}$);
- напряжение возникающие при формообразовании подсечки ($\sigma_{\text{пол}}$).

В результате по графикам видно изменения этих величин

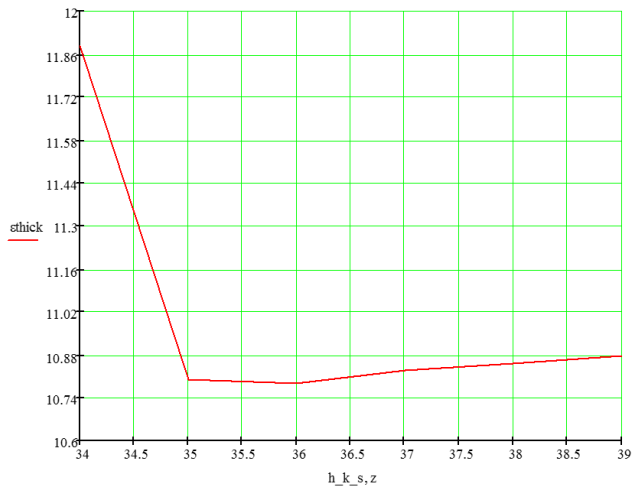


Рисунок 4.55 – Изменение деформации по толщине

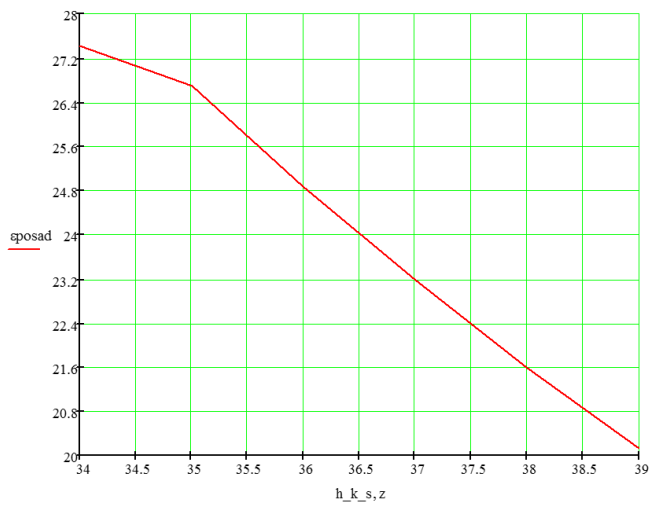


Рисунок 4.56 – Изменение полной деформации

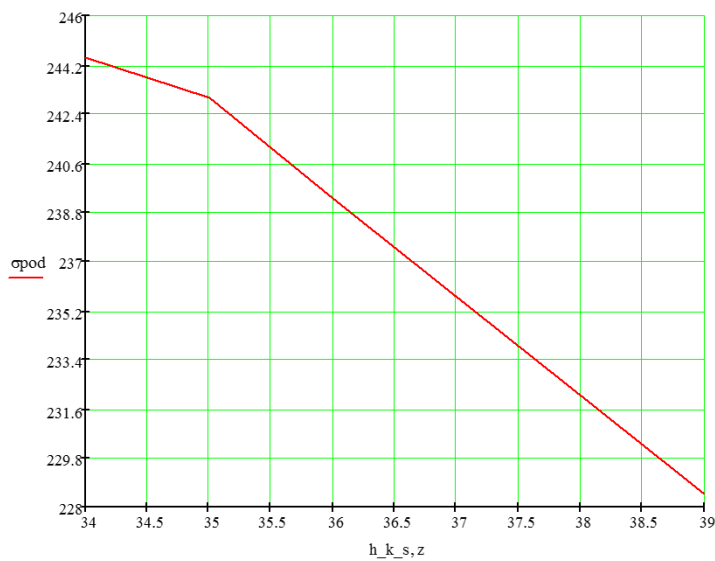


Рисунок 4.57 – Изменение напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для того чтобы вывести зависимость изменения данных величин от h/s воспользуемся методом наименьших квадратов [34]. Для интерполяции величин $\sigma_{\text{пол}}$ и $\varepsilon_{\text{пол}}$ использовалась степенная функция вида $y=a \cdot x^b+c$. Для величины ε использовалась аппроксимация в виде линейной комбинации функции $a \cdot x^2; b \cdot x^3; c \cdot x$ [49]. В результате получим:

– $\varepsilon_{\text{апрок}} = -0,236 \cdot (h/s)^2 + 0,0030589 \cdot (h/s)^3 + 4,816 \cdot (h/s)$ (см.Рисунок 4.58);

– $\varepsilon_{\text{посад_интер}} = 1556734,477 \cdot (h/s)^{-0,0000357} - 1556510,889$ (см.Рисунок 4.59);

– $\sigma_{\text{под_интер}} = 1556971,275 \cdot (h/s)^{-0,00007751} - 1556300,1677911$ (см.Рисунок 4.60).

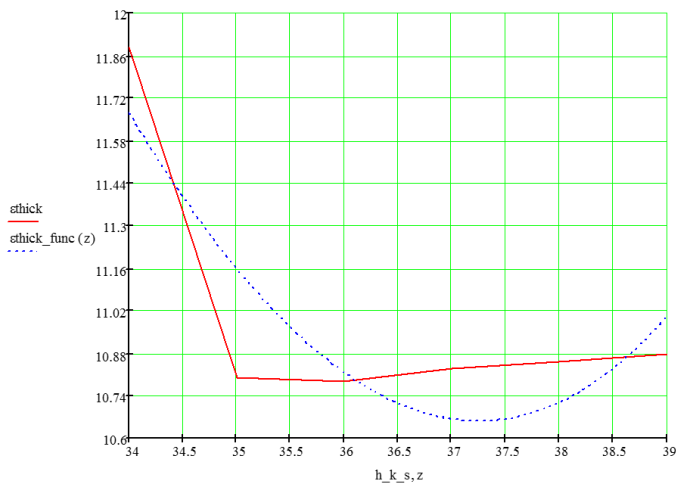


Рисунок 4.58 – Функция изменения деформации по толщине

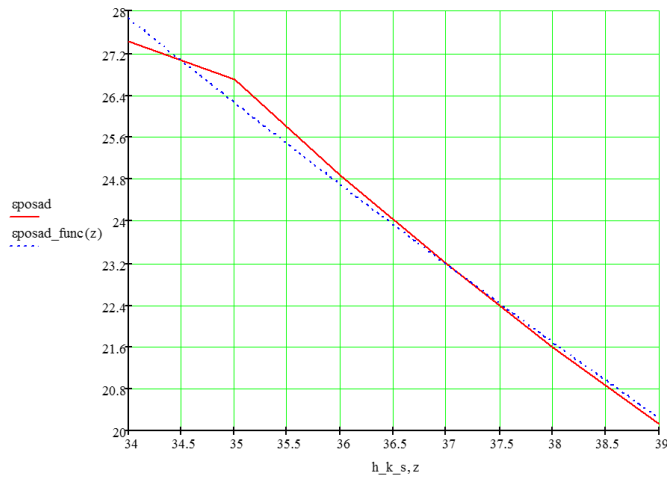


Рисунок 4.59 – Функция изменения полной деформации

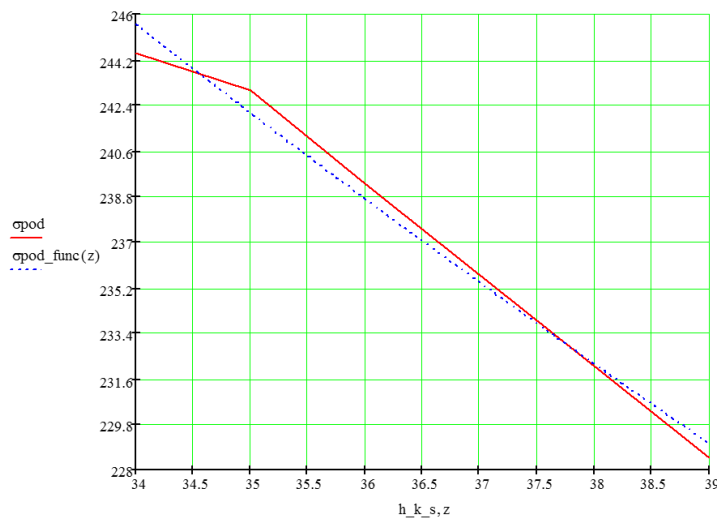


Рисунок 4.60 – Функция изменения напряжений, возникающих при формообразовании подсечки

Для оценки разницы между значениями выведенных функции и реальными можно воспользоваться критерием корреляции Пирсона или коэффициентом Пирсона [60]. В результате имеем для функций:

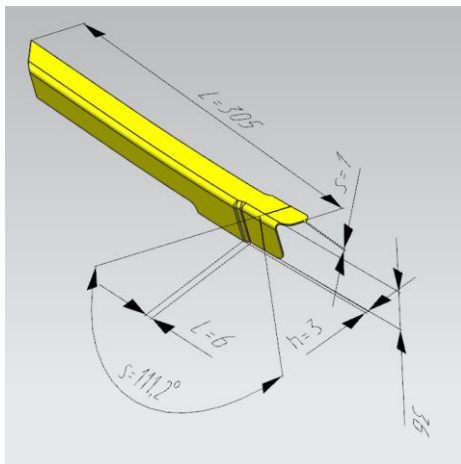
- $r_{\varepsilon_{\text{апрок}} \varepsilon_{\text{посад}}} = 0,8648$;
- $r_{\varepsilon_{\text{посад}} \varepsilon_{\text{посад_интер}}} = 0,9947$;
- $r_{\sigma_{\text{под}} \sigma_{\text{под_интер}}} = 0,9926$.

Для оценки корреляционной связи воспользуемся таблицей Чеддока (см. Таблица 4.5) [39, 57]. В нашем случае $r_{\varepsilon_{\text{посад}} \varepsilon_{\text{посад_интер}}}$, $r_{\sigma_{\text{под}} \sigma_{\text{под_интер}}}$ больше 0,9 что

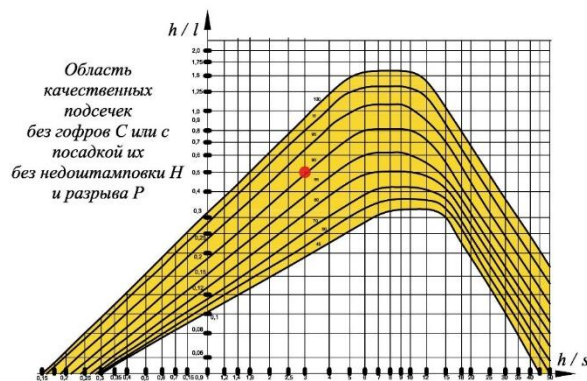
говорит о большей силе корреляционной связи т.е различие между функциями минимальны. Значение $r_{\varepsilon\varepsilon_{\text{апрок}}}$ больше 0,8 что говорит просто о высокой силе корреляционной связи, различие между функциями незначительны.

4.5. Натурный эксперимент на детали из трудно-деформируемого сплава

Все выше описанные результаты работы подтверждают работоспособность методики применительно к алюминиевым сплавам т.к номограмма предназначена для алюминиевых сплавов. Однако потенциал использования данной методике больше. Для подтверждения этого была выбрана деталь из трудно-деформируемого сплава ОТ-4 (см.Рисунок 4.61).



а)



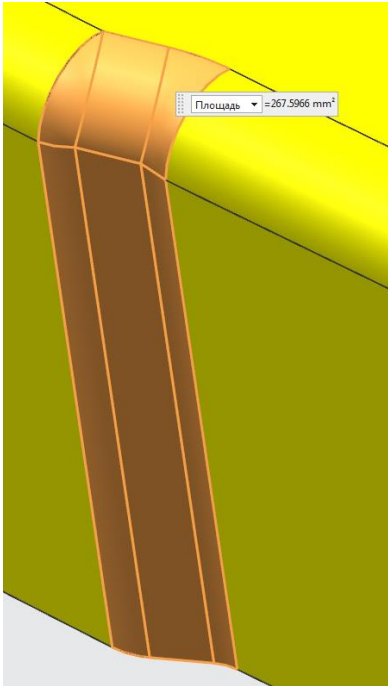
б)

а) геометрическая модель деталь из титана с параметрами; б) положение детали на номограмме.

Рисунок 4.61 – Деталь из трудно-деформируемого сплава ОТ-4

По номограмме (см.Глава 2, Рисунок 2.1) деталь находится в левой стороне, следовательно, методика расчета будет применена как для детали №2. Рассчитываем основные площади через формулу Брахмагупты (см. (см.Глава 2,Формула (2.22):

- $S_1 = 267,596 \text{ мм.}^2$ (см.Рисунок 4.62 а);
- $S = 239,56 \text{ мм.}^2$ (см.Рисунок 4.62 б);
- $S_3 = 1710,334 \text{ мм.}^2$ (см.Рисунок 4.63 а);
- $S_4 = 1511,767 \text{ мм.}^2$ (см. Рисунок 4.63 б)



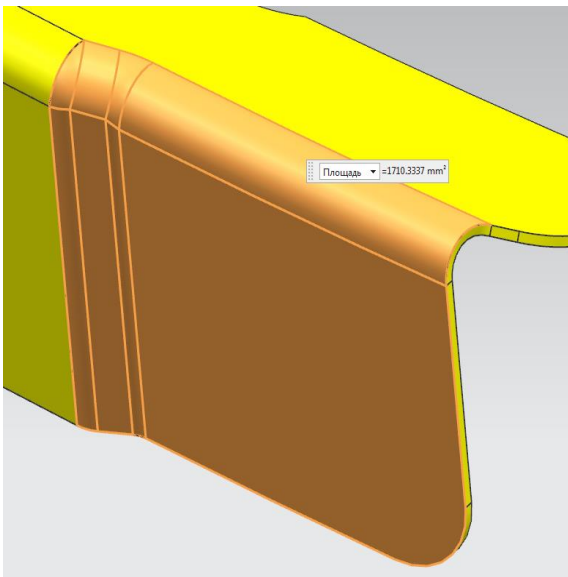
а)



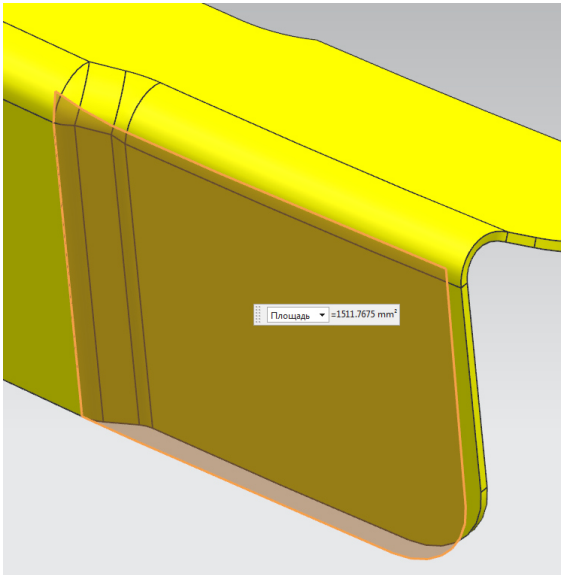
б)

а) площадь S_1 ; б) площадь S .

Рисунок 4.62 – Основные площади для расчета №1



а)



б)

а) площадь S_3 ; б) площадь S_4 .

Рисунок 4.63 – Основные площади для расчета №2

Деформация по толщине вычисляется по формуле (4.14):

$$\varepsilon = \frac{S_1 - S}{S_1} \cdot 100\% = \frac{267,596 \text{ мм.}^2 - 239,56 \text{ мм.}^2}{267,596 \text{ мм.}^2} \cdot 100\% = 10,477\% \quad (4.14)$$

Минимальная толщина после формообразования вычисляется по формуле (4.15):

$$S_{i(\min)} = S_0 - \frac{\varepsilon \cdot S_0}{100\%} = 1 \text{ мм.} - \frac{10,477\% \cdot 1 \text{ мм.}}{100\%} = 0,895 \text{ мм.} \quad (4.15)$$

Полная деформация вычисляется по формуле (4.16):

$$\varepsilon_{\text{пол}} = \frac{S_3 - S_4}{S_3} \cdot 100\% = \frac{1710,334 \text{ мм.}^2 - 1511,767 \text{ мм.}^2}{1710,334 \text{ мм.}^2} \cdot 100\% = 11,61\% \quad (4.16)$$

Для нахождения потребного давления необходимо рассчитать напряжения в пластической части кривой течения. Для описания поведения материала в пластической зоне воспользуемся функцией «Krupkowsky law» (см.Глава 2, Формула (2.34)[88]. Для ОТ-4 $K = 845,103 \text{ МПа}$, $n = 0,07543$; $\varepsilon_0 = 0,00000001$ и $\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{пол}} / 100\%$.

В нашем случае напряжения равны (см.Формула (4.17):

$$\sigma_{\text{под}} = 845,103 \text{ МПа} (0,00000001 + 0,318)^{0,07543} = 718,405 \text{ МПа} \quad (4.17)$$

Зная напряжения формообразования (см.Формула (4.17) и суммарную площадь формообразования (см.Глава 2, Таблица 2.2). можно найти потребное усилие формообразования данной подсечки (см.Формула (4.18):

$$F_{\text{пот}} = \sigma_{\text{под}} \cdot (S_{1\text{под}} + S_{2\text{под}} + S_{3\text{под}} + S_{4\text{под}} + S_{5\text{под}} + S_{6\text{под}}) =$$

$$845,103\text{МПа} \cdot \left(\begin{array}{l} 18,147\text{мм.}^2 + 132,193\text{ мм.}^2 + 143,472\text{ мм.}^2 \\ +183,387\text{ мм.}^2 + 211,52\text{ мм.}^2 + 87,356\text{ мм.}^2 \end{array} \right) = 845,103\text{МПа} \cdot$$

$$956,315\text{мм.}^2 = 687021,769\text{Н} \quad (4.18)$$

Площадь воздействие давления для создания усилия можно найти [21] (см.Глава 2, (см.Формула (2.37). Исходя из этого можно вывести формулу для среднего давления (см.Глава 2, (см.Формула (2.38). Исходя из этого можно построить график показывающий изменение площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления (см.Рисунок 4.64).

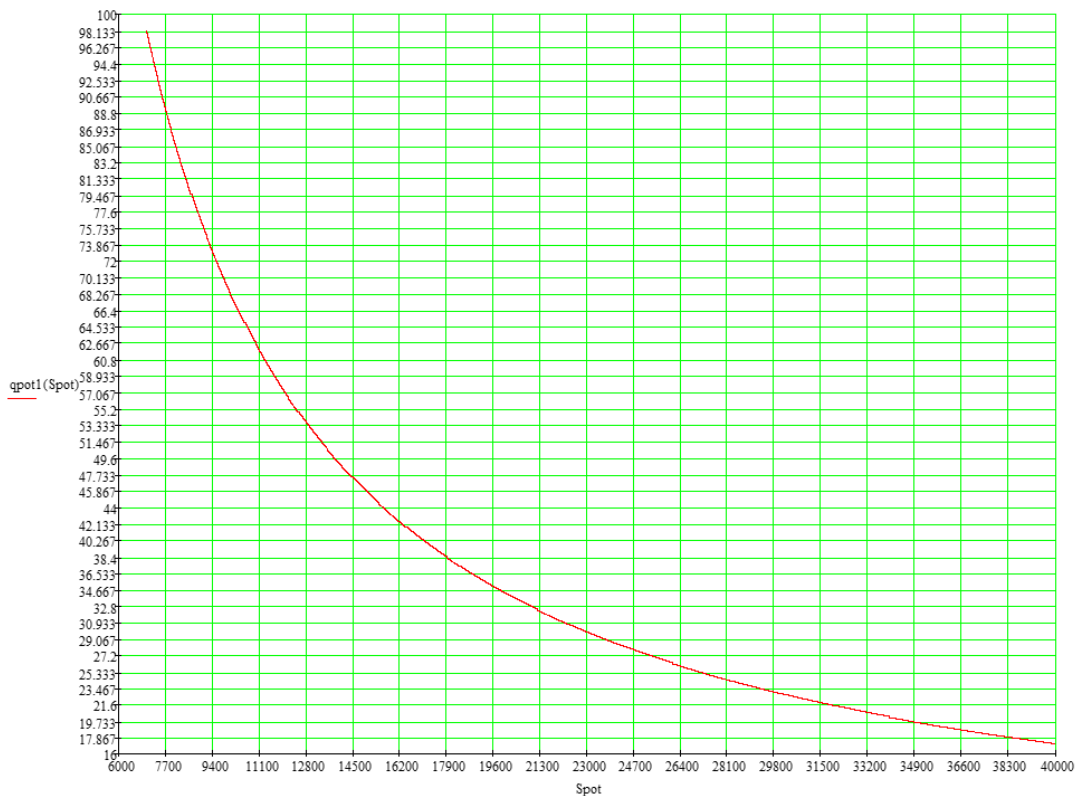


Рисунок 4.64 – График изменения площади воздействия давления на жестком инструменте в зависимости от давления

По графику (см.Рисунок 4.64) видно, что чем меньше площадь воздействия давления на жестком инструменте, тем больше давление. Предположим, что выбрано формовочное давление в 20,5 МПа то по формуле (см.Формула (4.19):

$$S_{\text{пот}} = \frac{F_{\text{пот}}}{q_{\text{пот}}} = \frac{687021,769\text{Н}}{20,5 \text{ МПа}} = 33633 \text{ мм}^2 \quad (4.19)$$

В качестве профиля опорной кривой подвижного прижима задана следующая кривая (см.Рисунок 4.65)



Рисунок 4.65 – Профиль в системе координат xOy

Используя метод наименьших квадратов интерполируем профиль кривой полиномом 4 порядка. В результате получим (см.Формула (4.20):

$$y(x) = -0,076615 + 0.812644 \cdot x + 0.013748 \cdot x^2 - 0.00104381 \cdot x^3 + 0.0000188464 \cdot x^4 \quad (4.20)$$

График показывает совпадение точек профиля и построенной функции (см.Рисунок 4.66).

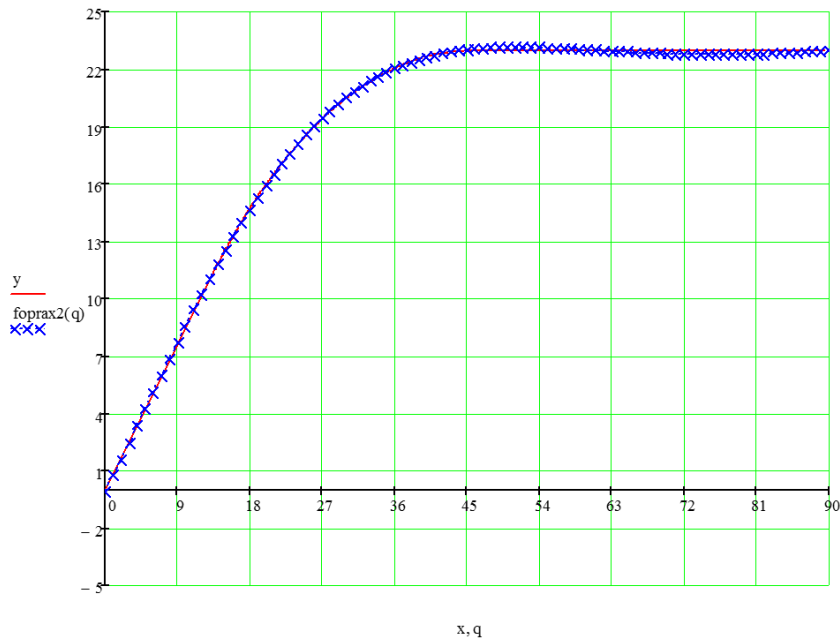


Рисунок 4.66 – Сравнение графиков

Теперь можно составить уравнение поверхности. Если оно не зависит от значения перпендикулярно плоскости профиля оно будет иметь вид (см.Формула (4.21):

$$z(x, y) = -0,076615 + 0,812644 \cdot x + 0,013748 \cdot x^2 - 0,00104381 \cdot x^3 + 0,0000188464 \cdot x^4 \quad (4.21)$$

Для детали была спроектирована оснастка, подштамповая плита и подвижный прижим по результатам аналитического расчета (см.Рисунок 4.67).

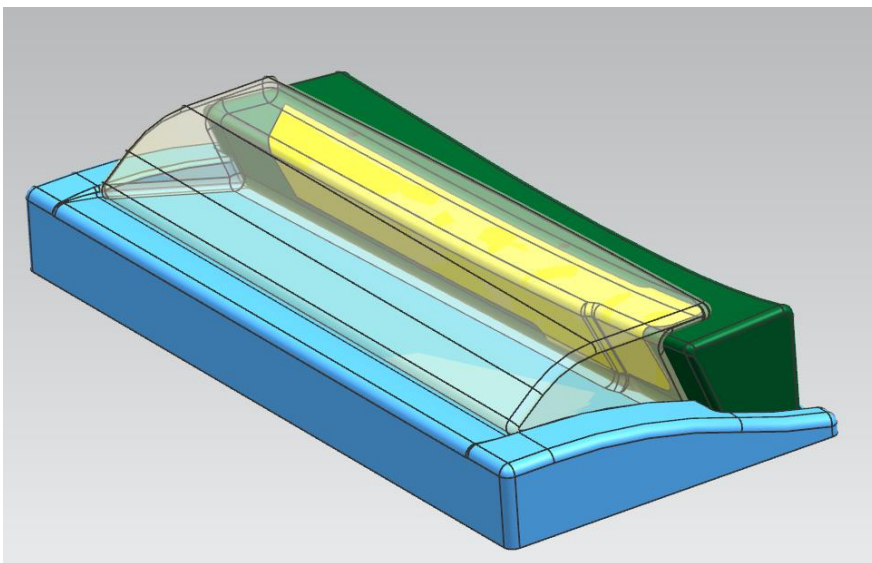


Рисунок 4.67 – Комплект оснастки для формообразования титановой детали

Подштамповая плита сделана для сохранения направления движения прижима за счет паза. Паз сделан под углом 15° для исключения заклинивания подвижного прижима во время формообразования. Также в подштамповой плите выполнены два штыря для позиционирования оснастки и предотвращения ее движения во время формообразования. Подвижный прижим выполнен с контактной площадью с эластичной средой равной расчетной 33363 мм^2 (см.Рисунок 4.68).

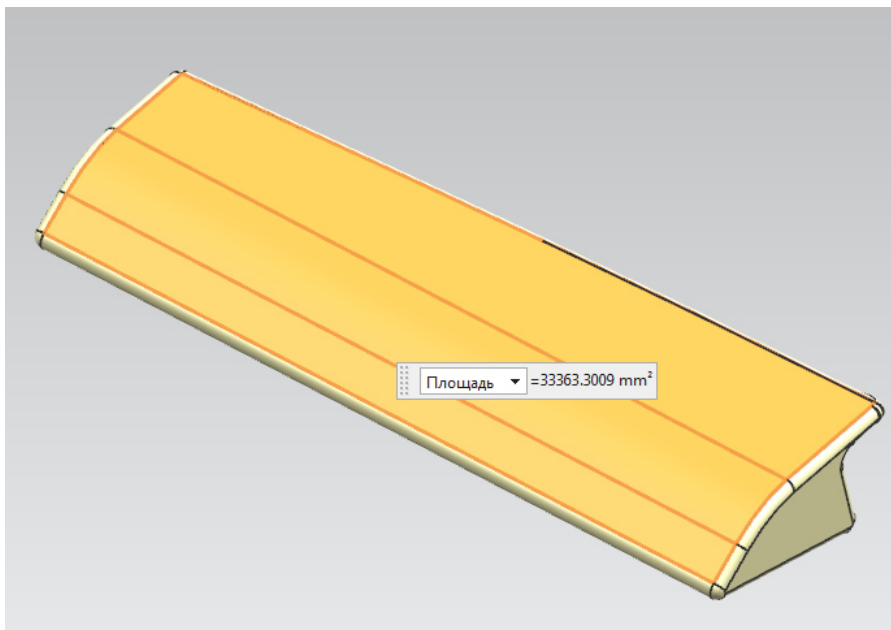


Рисунок 4.68 – Контактная площадь подвижного прижима

Используя производную функции профиля (см.Формула (4.20)) были найдены диапазоны изменения угла наклона прямолинейной части профиля (см.Глава 2, раздел 2.3) и, они составили от $39,1^\circ$ до $41,387^\circ$. Выбрано целое значение 40° (см.Рисунок 4.70).

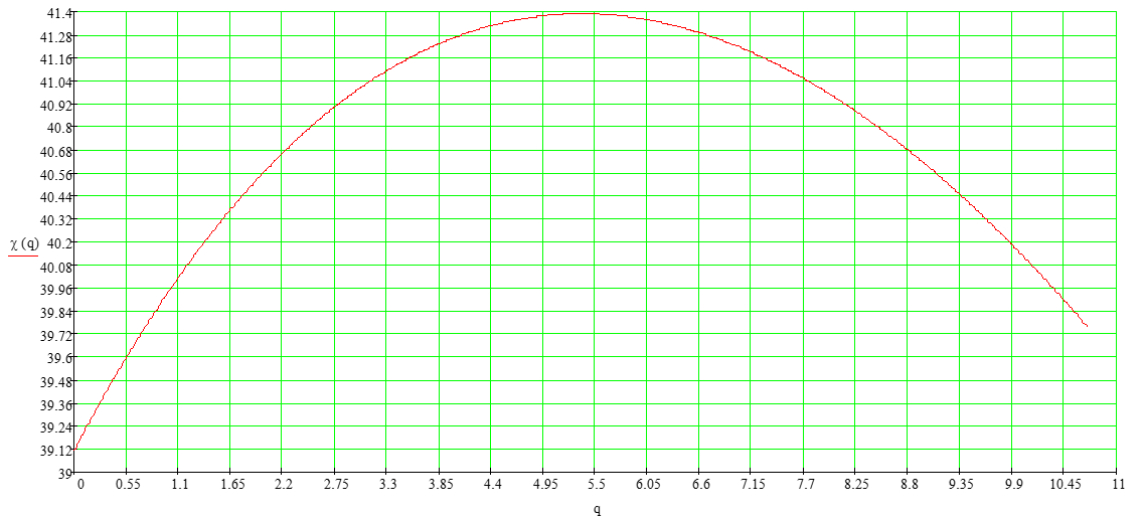


Рисунок 4.69 – График изменения угла наклона

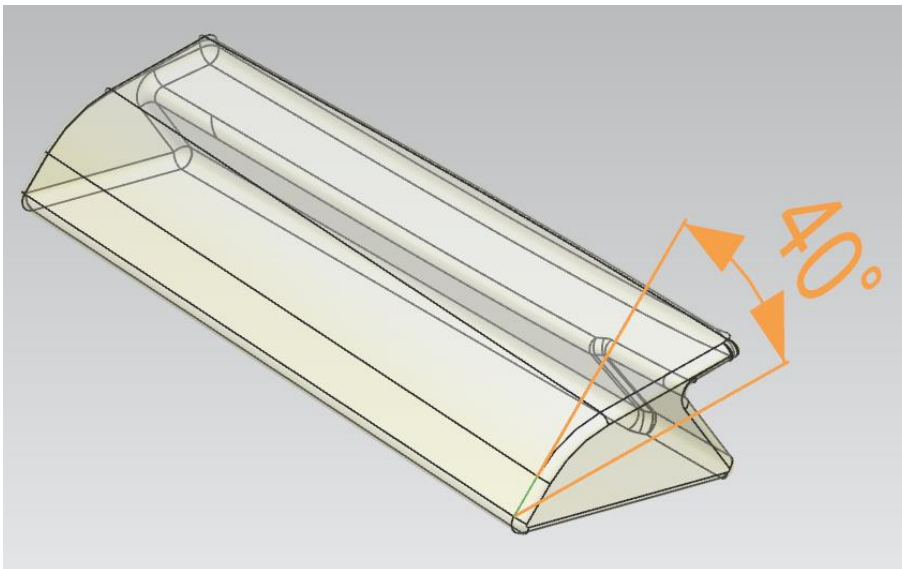


Рисунок 4.70 – Угол наклона подвижного прижима в зоне контакта с эластичной средой

Схема формообразования включает:

- перед проведением формообразования на стол пресса устанавливается оснастка, закрепленная на подштамповой плите с пазом для установки подвижного элемента;
- на шпильки оснастки устанавливается заготовка, после чего проводится предварительное формообразование;

– на подштамповую плиту в пазы устанавливается подвижный прижим и выполняется окончательное формообразование, что обеспечивает качественное получение детали с подсечкой.

По аналитическому расчету и созданным геометрическим моделям был изготовлен комплект оснастки (см.Рисунок 4.71).



Рисунок 4.71 – Комплект оснастки для формообразования титановой детали

В результате формообразования на прессе QFC 1.2x3 -1000 при давлении 20,5 МПа. была отформована деталь с использованием подвижного прижима (см.Рисунок 4.72).



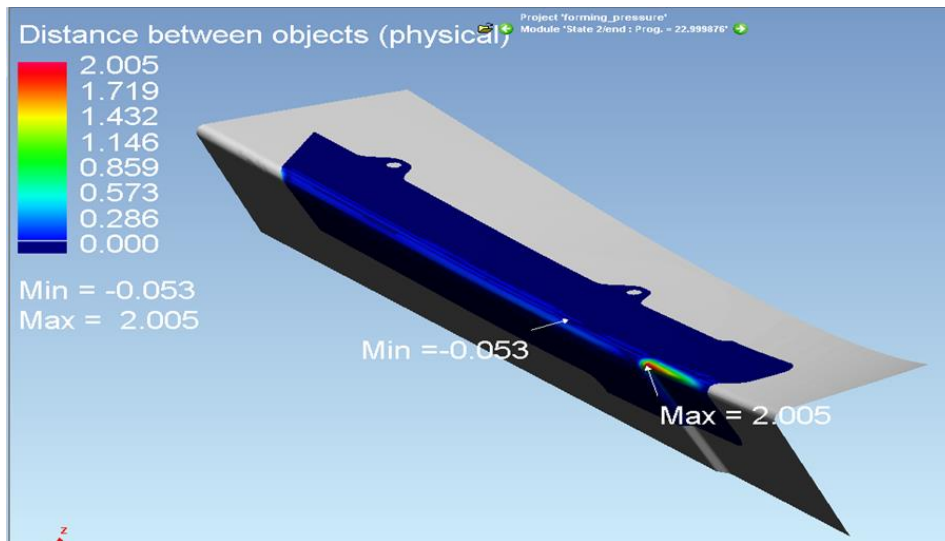
Рисунок 4.72 – Отформованная деталь из титана с применением подвижного прижима

Для подтверждения работоспособности методики и доказательства невозможности изготовления данной детали без подвижного прижима был произведен натурный эксперимент на производственной установке QFC 1.2x3 - 1000 при давлении 100 МПа (см.Рисунок 4.73).

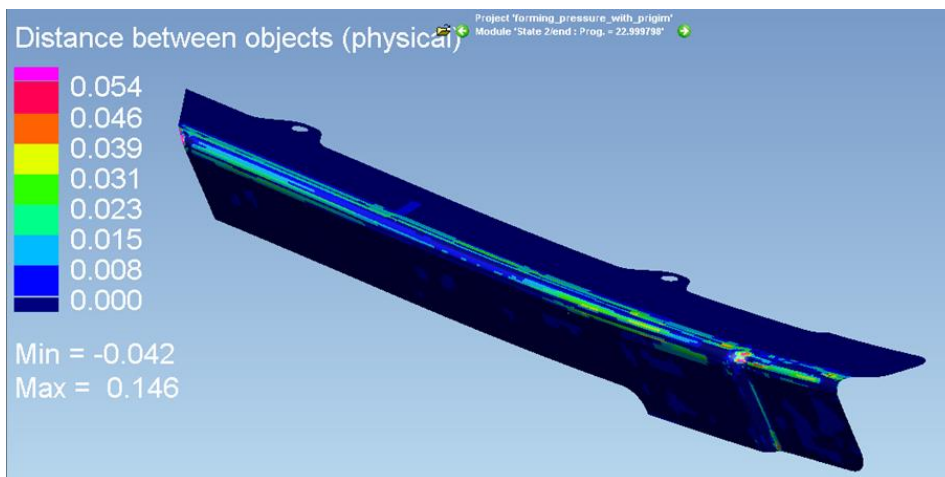


Рисунок 4.73 – Отформованная деталь из титана без применения подвижного прижима

Визуально можно оценить, что зона подсечки не формируется даже при максимальном давлении (см. Рисунок 4.73), тогда как с предлагаемой технологией давление в 5 пять раз меньше и деталь получается (см.Рисунок 4.72). Для оценки аналитически результатов формообразования и недоформовки воспользуемся конечно-элементным анализом в ПО RAM-STAMP (моделирование показало разницу не более 2% с натурным экспериментом (см.Глава 3, раздел 3.3, 3.4).



a)



б)

а) результат формообразования без подвижного прижима; б) результат формообразования с подвижным прижимом.

Рисунок 4.74 – Моделирование формообразования

Результаты показывают, что недоштаповка в районе подсечки без применения подвижного прижима составляет 2 мм. (см.Рисунок 4.74 а), а с применением подвижного прижима недоштаповка 0,054 мм. (см.Рисунок 4.74 б).

4.6. Выводы

1. Собран блок эластоформования для проведения натуральных экспериментов и произведен его монтаж на пресс ИП 1250.
2. Проведены натурные эксперименты для детали №2 и детали №3 на прессе ИП 1250 с установленным блоком эластоформования.
3. Проведен анализ результатов натуральных экспериментов для детали №2 и детали №3 и сравнение с предлагаемой методикой и методом конечных элементов. Анализ и сравнение показало разницу результатов не более 2%.
4. Выведены формулы для изменения основных (деформации по толщине, полной деформации, напряжения возникающие при формообразовании подсечки) параметров при движении по номограмме для детали №2 и детали №3.
5. Проведен натуральный эксперимент детали из титанового сплава. Работоспособность методики подтверждена для трудно-деформируемых сплавов без температурного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена проблема, связанная с формообразованием подсечек на листовых деталях. Предлагаемое решение основано на использовании дополнительного элемента оснастки, который позволяет локализовать деформации в местах появления дефектов и повышать формообразующие усилия.

В качестве такого дополнительного элемента оснастки был предложен подвижный элемент, названный «подвижный прижим». Предложена уникальная форма данного элемента оснастки, которая позволяет ему перемещаться при формообразовании и оказывать воздействие в место образования дефектов на детали. Со стороны эластичной среды «подвижный прижим» имеет интегральную форму обеспечивающую необходимую передачу усилия под углом на деталь.

В процессе решения проблемы связанной появлением дефектов на деталях при формообразовании и проектировании «подвижного прижима» были решены следующие задачи:

1. разработано уравнение приводящей поверхности подвижного прижима для правой и левой части номограммы;
2. разработана математическая модель для расчета утонения и деформации утонения в зоне подсечек исходя из допущений модели Брахмагупты и правила Саррюса;
3. разработана математическая модель для расчета полной деформации формообразования для правой и левой части номограммы;
4. разработана математическая модель для расчета потребной площади приводящей поверхности подвижного прижима исходя из параметров подсечки и характеристик оборудования для формообразования;
5. для правой части номограммы разработано математическая модель для определения потребного давления на первом переходе;

б. разработана методика определения угла наклона в начале профиля опорной кривой используя анализ экстремумов и дифференцирования функции профиля опорной кривой.

Проектирование «подвижного прижима» начинается с анализа подсечки и определение деформации ее формообразования и утонения на основании формулы Брахмагупты. Далее составляется уравнение поверхности и определяются необходимые коэффициенты по методу наименьших квадратов. На основании этих данных определяется необходимая площадь контакта «подвижного прижима» с эластичной средой на основании формулы Герона и криволинейного интеграла первого рода. Исходя из этой информации можно выбрать такую площадь контакта, которая соответствует имеющемуся оборудованию (естественно, чем больше давление, развиваемое прессом, тем меньше необходимая площадь контакта). В конце используя анализ экстремумов и дифференцирования функции профиля опорной кривой определяется угол наклона профиля в начале опорной кривой. Вся эта информация нужна для проектирования и конструирования геометрической модели «подвижного прижима». После проектируется и конструируется комплект оснастки для формообразования состоящий из: «подвижного прижима» (основной формирующий элемент на втором переходе); подштамповая плита (элемент обеспечивающий наклон в движение «подвижного прижима» и сохранения его направления за счет пазов); оснастка (элемент, являющийся носителем формы детали). Основной идеей является получения устранимого дефекта на первом переходе и устранения его на втором переходе при использовании «подвижного прижима».

Практические выводы по использованию результатов данной работы:

- 1) Создание технологии формообразования с подвижным прижимом;
- 2) Устранения дефектов «недоштамповка» и «гофрообразование»;

3) Расширение возможностей формообразования подсечек на листовых деталях (как минимум на 65% относительно нормативной документации ОСТ 1.52468-80);

4) Возможность формообразования сложных деталей двойной кривизны с подсечками из труднодеформируемых сплавов без температурного воздействия;

5) Существенное сокращение трудоемкости изготовления деталей с подсечками (как минимум на 50% относительно схемы формообразования без подвижного прижима);

6) Снижение требуемого давления как минимум на 40% при формообразовании деталей с подсечками и как следствие уменьшение стоимость оборудования.

Результаты работы использованы при:

– в рамках договора по постановлению 218 Правительства РФ "Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета" № ИрГТУ 218-3.13.1.017 2013 г.- 2015 г.;

– НИОКР с ИАЗ – филиала ПАО «Корпорация «ИРКУТ» "Разработка методики проектирования рабочей поверхности средств технологического оснащения (СТО) для процесса гидроэластичной формовки на прессе «Avure». Разработка технологической документации на изготовление деталей методом гидроэластичной формовки", 25.01.2017 по 25.01.2018;

А также технологию формообразования с подвижным прижимом оформлена заявка на патент №2017142652 и получено решение о выдаче патента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абибов А.Л. Технология самолетостроения / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др.; Под ред. А.Л. Абибова. – 2-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1982. – 551с.
2. Аверченков В. И. Автоматизация проектирования технологических процессов. Учебное пособие для вузов / В.И. Аверченков, Ю.М. Казаков. - Брянск, Изд. БГТУ, 2004. - 228 с.
3. Бермант А.Ф., Араманович И.Г. "Краткий курс математического анализа для вузов", М., Наука, 1976 г.
4. В. Г. Болтянский, Что такое дифференцирование?, «Популярные лекции по математике», Выпуск 17, Гостехиздат 1955 г., 64 стр.
5. В. Н. Дубровский, В поисках определения площади поверхности. Квант. 1978. № 5. С.31—34.,
6. Ведмидь П.А., Сулинов А.В. В26 Программирование обработки в NX САМ. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.: ил. ISBN 978-5-97060-143-3
7. Вейл Н, А., Нимарк Н. М. Большие пластические деформации круглых мембран. «Прикладная механика», 1955, № 9.
8. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — 10-е изд., стер.. — М.: Academia, 2005. — 576 с. — ISBN 5-7695-2311-5.
9. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике. — Москва: Астрель, 2006. — 991 с. — ISBN 5-271-03651-0.
10. Выгодский, М. Я. Дифференцирование и интегрирование функций нескольких аргументов // Справочник по высшей математике. — М.: Астрель, АСТ, 2005. — 991 с. — 10 000 экз. — ISBN 5-17-012238-1, 5-271-03651-0,
11. Галёркин Б. Г. Стержни и пластинки. Ряды в некоторых вопросах упругого равновесия стержней и пластинок. // Вестник инженеров. — 1915. — Т. 1. — С. 897—908.
12. Гляйцель А., Вашингтон Д. С, Пластическая деформация круглой диафрагмы под давлением. «Прикладная механика», 1948, № 9.

13. Голубев Ю. Ф. Основы теоретической механики. 2-е изд. — М.: Изд-во МГУ, 2000. — 720 с. — ISBN 5-211-04244-1
14. ГОСТ 26020-83 Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент.
15. Ефимов Н.А., Федотов Ю.В. ТЕХНОЛОГИЯ ПОШАГОВОЙ ШТАМПОВКИ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОЛИУРЕТАНОМ // Вестник Самарской государственной академии путей сообщения. 2007., № 8. С. 77-80
16. Желтиков С.А., Лавриненко В.Ю. УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ "КОЖУХ" С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАМ-STAMP В сборнике: ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ // Материалы IV международной студенческой научно-практической конференции. Редакционная коллегия: Е.Н. Еремин (отв. редактор), Ю.О. Филиппов, А.Г. Анатольев. 2015., С. 77-83.
17. Жуков А.М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии. Инженерный сборник, XX. Изд-во АН СССР, 1946
18. Замаараева Ю.В., Логинов Ю.Н. ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ ЗАДАЧА ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ В 3D ПОСТАНОВКЕ // В сборнике: Magnitogorsk Rolling Practice 2018 Материалы III молодежной научно-практической конференции. Под редакцией А.Г. Корчунова. 2018., С. 40-41.
19. Захарьев И.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАГОТОВКИ ПРИ ФОРМОВКЕ В ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ МАТРИЦ // В сборнике: Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Арменского Материалы конференции . 2017., С. 11-12.
20. Захарьев И.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МНОГОКУПОЛЬНОЙ ФОРМОВКИ // В книге: Авиакосмические технологии (АКТ-2015) Тезисы I тура XVI Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. 2015., С. 105-107.
21. Захарьев И.Ю. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ ГАЗОВОЙ ФОРМОВКИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ // В сборнике: Научно-

техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского Материалы конференции. Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». 2015., С. 20-21.

22. Захарьев И.Ю., Аксенов С.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ ФОРМОВКИ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ ГАЗОМ // В сборнике: Авиакосмические технологии (АКТ-2014) Труды XV Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. 2014., С. 32-38

23. Зенкевич, О. К. Конечные элементы и аппроксимация / О. К. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

24. Ильин, В. А., Позняк, Э. Г. Глава 2. Двойные и n-кратные интегралы // Основы математического анализа. — 4. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. — Т. 2. — 464 с. — (Курс высшей математики и математической физики). — 5000 экз. — ISBN 5-9221-0131-5.

25. Ильюшин А.А. Пластичность ОГИЗ Москва; Ленинград: ОГИЗ, 1948. — 376 с.

26. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 367 с.

27. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М.Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с., Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 407 с.

28. Краткий фотографический справочник / Под общей редакцией д.т.н. В. В. Пуськова. — 2-е изд. — М.: Искусство, 1953.

29. Кудрявцев В.А., Демидович Б.П. "Краткий курс высшей математики", М., Наука, 1986г., 1.3.

30. Кузнецов В. Н. Давление. Большая Российская Энциклопедия

31. Лавриненко В.Ю., Баженов В.Г., Павленкова Е.В. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УДАРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА

КОВОЧНЫХ МОЛОТАХ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013., № 1. С. 20-28.

32. Лавриненко В.Ю., Соловьев Б.М., Шукшин А.В. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ДЕТАЛИ И СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЫТЯЖНОГО ШТАМПА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ САД/САМ/САЕ - СИСТЕМ PRO/ENGINEER И PAM-STAMP // В сборнике: Молодые ученые - промышленности, науке, технологиям и профессиональному образованию: проблемы и новые решения Сборник научных докладов VII Международной научно-практической конференции. 2007., С. 204-208.

33. Ландсберг Г. С. Оптика. — 5-ое изд. — М.: Наука, 1976., Линза // Фотокинетика: Энциклопедия / Гл. ред. Е. А. Иофис. — М.: Советская энциклопедия, 1981.

34. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. — 2-е изд. — М., 1962. (математическая теория)

35. Лурье А. И. Теория упругости. — М.: Наука, 1970. — 940 с.

36. Марьин С.Б., Куриный В.В., Куриная Н.П., Черников Р.В., Прилуцкий Н.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШТАМПОВКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ "QFORM" В УСЛОВИЯХ ПРОИЗВОДСТВА ОАО "АСКОЛЬД" Г. АРСЕНЬЕВ // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2011. Т. 1., № 6. С. 81-85.

37. Марьин С.Б., Серафимов М.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ТРОЙНИКОВ ЖИДКОСТНЫМИ И ЭЛАСТИЧНЫМИ СРЕДАМИ ПРИ РАЗНЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ ТРЕНИЯ // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009., № 6. С. 31-32.

38. Математический энциклопедический словарь / Гл.ред. Ю.В. Прохоров. — М.: Советская энциклопедия, 1988.

39. Мацкевич, И.П. Высшая математика: Теория вероятностей и математическая статистика / И.П. Мацкевич, Г.П. Свирид. - Минск: Выш. шк., 1993. - 269 с.

40. Медведев Б. В. Начала теоретической физики. Механика, теория поля, элементы квантовой механики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — С. 186. — ISBN 978-5-9221-0770-9.

41. Мерзон Г.А., Яценко И.В. Длина, площадь, объем. — МЦНМО, 2011. — ISBN 9785940577409

42. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. О методике оценке анизотропии механических свойств металлов. Заводская лаборатория, 1965, №4

43. Мироненко В.В. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РАМ-STAMP ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ЭЛАСТОФОРМОВАНИЯ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В сборнике: СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ // Статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции. 2014., С. 217.

44. Мироненко В.В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПРОФИЛЕЙ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА И КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ В сборнике: СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ // Статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции. 2014., С. 218.

45. Мироненко В.В. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ПРОЦЕССОВ ОБТЯЖКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В сборнике: СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ, ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ И

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ // Статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции. 2014., С. 219.

46. Мироненко В.В., Чеславская А.А. Расчет разверток деталей летательных аппаратов с учетом изменения толщины листа в результате формовки // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2014. Т. 1, № 1 (17). С. 13–17

47. Михайлов Ю.О., Дресвянников Д.Г., Князев С.Н. Гидромеханическая вытяжка высоких конических деталей // Интеллектуальные системы в производстве. 2011., № 1 (17). С. 121-125.

48. Михайлов Ю.О., Дресвянников Д.Г., Князев С.Н. Интенсификация процесса вытяжки из листовых заготовок с использованием жидкостной и эластичной сред // Интеллектуальные системы в производстве. 2011., № 1 (17). С. 126-132.

49. Н. Бахвалов, Н.Жидков, Г. Кобельков. Численные методы. —М.: Изд. Физматлит, 2006.

50. ОСТ 1.41466-73. Штамповка листовых подсечек эластичной средой. Типовой технологический процесс

51. ОСТ 1.51728-73. Оснастка для штамповки листовых подсечек эластичной средой

52. ОСТ 1.52468-80. Подсечки в деталях из листового материала. Конструкция и размеры.

53. ОСТ 4Г 0.010.221-81 Отклонения формы и расположения поверхностей. Допуски назначения и применение ; ОСТ 107.14.201-91. Обработка резанием. Общие требования к конструкциям деталей

54. ПИ 1.4.1977-2006 ПИ 1.4.1977. Уменьшение отклонения после фрезерования объясняется снижением жесткости профиля 29 стр.

55. Пискунов Н.С. "Дифференциальное и интегральное исчисления", т. 1,2, М., Интеграа-Пресс, 1997г.,

56. Поличенков Е.В. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ "КРОНШТЕЙН" // Известия Московского государственного индустриального университета. 2012., № 2 (26). С. 19-22.
57. Поллард, Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Дж. Поллард. - М.: Финансы и статистика, 1982. - 343 с.
58. Пшеничный Б.Н. Необходимые условия экстремума. — М.: Наука, 1969. — 150 с.
59. РДМУ 95-77. М. : НИИПТМАШ, 1978. Электронный ресурс <http://mashinport.ru/gost.php?id=1494> (дата обращения 27.03.2019)
60. Ример М.И., Касатов А.Д., Матиенко Н.Н. Экономическая оценка инвестиций: учебник для вузов. 2-е изд. СПб:Питер, 2007. 480 с.
61. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Том 1. М.: Наука, 1970. 492 с.;
62. Смирнов-Аляев Г. А. Исследования по теории пластичности.Сборник статей. М — Л., Машгиз, 1939.
63. Старовойтов Э. И. Сопротивление материалов. — М.: Физматлит, 2008. — С. 384. — 1000 экз. — ISBN 978-5-9221-0883-6. ;
64. Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Петров И.Н. ОПТИМИЗАЦИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБШИВОЧНЫХ ЛИСТОВ С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПРИ ОБТЯЖКЕ // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017., № 2 (40). С. 49-55.
65. Томленов А. Д. Теория гидростатического испытания листового металла. «Вестник машиностроения», 1953, № 10, Щеглов Б. А. К вопросу об испытании листовой стали на двухосное растяжение методом гидравлической вытяжки, Сб. «Исследования в области обработки металлов давлением». Изд-во АН СССР, 1960
66. Трусделл К. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред. М.: Наука, 1975. 592 с.
67. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. — 10-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. — Т. 2. — 592

с. — (Механика в техническом университете). — ISBN 5-7038-1340-9; УДК 539.3/6(075.8); ББК 30.121 Ф42.

68. Фирма High Pressure Technology | Quintus Technologies [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://quintustechnologies.com/knowledge-center/data-sheet-fluid-cell-type-presses-type-qfc-us/>

69. A.S. Khan, M. Baig, S.H. Choi, S.H. Yang, and X. Sun, Quasi-static and Dynamic Responses of Advanced High Strength Steels: Experiments and Modeling, Int. J. Plasticity, 2012, 30–31, p 1–17

70. Aksenov S.A., Chumachenko E.N., Kolesnikov A.V., Osipov S.A. DETERMINATION OF OPTIMAL GAS FORMING CONDITIONS FROM FREE BULGING TESTS AT CONSTANT PRESSURE // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Т. 217., С. 158-164.

71. Andrew Gelman, John B. Carlin, Hal S. Stern, and Donald B. Rubin (2003), «Bayesian Data Analysis», Second Edition, CRC Press

72. Belytschko T., Lin J.I., Tsay C.S. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1984. Vol. 43. P.251–276.,

73. Cheslavskaya A.A., Mironenko V.V., Bersenev S.A., Kotov V.V. Forming of tee parts by a process that combines diffusion welding and pneumothermal forming in the superplastic regime // Metallurgist. 2013. Т. 56., № 11-12. С. 899-903.

74. Cover, Thomas M. Elements of Information Theory. — John Wiley and Sons, 2006. — P. 254.

75. Demyanenko E.G., Popov I.P., Epifanov A.N. SIMULATION OF PLASTIC FORMING PROCESS OF SHELLS WITH MINIMAL THICKNESS FLUCTUATIONS // В сборнике: Procedia Engineering 3. Сер. "3rd International Conference " Information Technology and Nanotechnology", ITNT 2017" 2017., С. 489-494.

76. Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Y.N. MODELING THE FORMATION OF AUTOMOBILE BODY PANELS BY AN ELASTIC PUNCH IN THE SOFTWARE PACKAGE PAM-STAMP 2G // Metallurgist. 2013. Т. 56., № 9-10. С. 647-651.

77. Ershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N. CAPABILITIES OF QFORM-EXTRUSION BASED ON AN EXAMPLE OF THE EXTRUSION OF COMPLEX SHAPES // Metallurgist. 2012. T. 55., № 9-10. C. 695-701.
78. Fabík R., Kliber J., Kubina T., Mamuzic I., Aksenov S.A. MATHEMATICAL MODELLING OF FLAT AND LONG HOT ROLLING BASED ON FINITE ELEMENT METHODS (FEM) // Metalurgija (Zagreb, Croatia). 2012. T. 51., № 3. C. 341-344.
79. Ferziger, Joel H., Peric Milovan. Computational Methods for Fluid Dynamics — Springer, 2002.
80. Grechnikov F., Gorshkov Y., Erisov Y. BENDING PROCESS SIMULATION OF A FLAT WORKPIECE WITH VARIOUS CROSS-SECTIONAL MECHANICAL PROPERTIES WITH PAM-STAMP 2G // Key Engineering Materials. 2016. T. 685., C. 133-136.
81. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K., Cheslavskaya A.A. CALCULATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR MULTILAYER STRUCTURES OF VARIABLE HEIGHT FOR THEIR MANUFACTURE BY THE METHOD OF SUPERPLASTIC FORMING AND DIFFUSION BONDING // Russian Aeronautics. 2015. T. 58., № 1. C. 124-128.
82. M. Bischoff and E. Ramm, Shear deformable shell elements for large strains and rotations, Int. J. Numer. Methods Eng. 40 (1997) 4427-4449. ,
83. Maugin, G. A. The thermodynamics of nonlinear irreversible behaviours: An introduction / G.A.Maugin. – World Scientific Publishing Co., 1999.– 392 p
84. Mironenko V.V., Kolesnikov A.V., Maksimenko N.V., Stanislavchik A.S., Kotov V.V. PNEUMOTHERMAL FORMING OF CORRUGATED STRUCTURES FROM SHEET IN THE SUPERPLASTIC REGIME // Metallurgist. 2014. T. 57., № 9-10. C. 767-773.
85. Nathan Altshiller-Court. College geometry : an introduction to the modern geometry of the triangle and the circle. — Dover Publications, Inc., 2007. — ISBN 0-486-45805-9.

86. Orlov G.A., Kotov V.V., Orlov A.G. PIPES FRACTURE SIMULATION AND CHANGES OF WALL THICKNESS VARIATION UNDER INTERNAL PRESSURE // В сборнике: 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 - Proceedings electronic edition. 2017., С. 8076460.
87. Osipov S.A., Mironenko V.V., Maksimenko N.V., Kotov V.V. Controlling thickness variation during pneumothermal forming in the superplastic regime // Metallurgist. 2013. Т. 57., № 1-2. С. 85-89.
88. PAM-STAMP 2012 User's Guide, ESI Group, 2012 – 960
89. R. Hill, The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford university press, Oxford, 1950, p 317–324
90. R.P.R. Cardoso and J-W. Yoon, One point quadrature shell element with throughthickness stretch, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. (in press).
91. Ritz W., Neue Methode zur Lösung gewisser Randwertaufgaben, «Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Math.-physik. Klasse. Nachrichten», Göttingen, 1908.
92. Ritz W., Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik, «Journal für die reine und angewandte Mathematik», 1909, Bd 135.
93. Ross Honsberger. Episodes in Nineteenth and Twentieth Century Euclidean Geometry. — Mathematical Association of America, 1995. — Vol. 37. — P. 17—26. — (New Mathematical Library). — ISBN 0-88385-639-5 (Vol. 37). — ISBN 0-88385-600-X (complete set).
94. Shmakov A.K., Mironenko V., Kirishina K.K., Stanislavchik A.S., Kotov V.V. Effect of the average velocity of the free part of the semifinished product on the process of pneumothermal forming in the superplastic regime // Metallurgist. 2013. Т. 57. № 1-2. С. 8-12.
95. Tomáš M., Hudák J. THE NUMERICAL SIMULATION OF THE DEEP DRAWING PROCESS AND ITS VERIFICATION BY THE ADAPTATION OF THE

LAMINATED TOOLING CONCEPT // Materials Science Forum. 2016. Т. 862., С. 222-229.

96. *Traité de l'équilibre des liqueurs*, 1663. Русский перевод: Паскаль, Тракта́т о равновесии жидкостей. В кн.: Начала гидростатики. Архимед, Стэвин, Галилей, Паскаль. М.-Л.: ГТТИ, 1932

97. W. Kahan, "What has the Volume of a Tetrahedron to do with Computer Programming Languages?", pp. 16-17.

98. Wentworth, G.A. *A Text-Book of Geometry*. — Ginn & Co., 1895.

99. Yershov A.A., Kotov V.V., Loginov Yu.N. OPTIMIZATION OF THE INITIAL FORM OF A SEMIFINISHED PRODUCT IN PAM-STAMP 2G // *Metallurgist*. 2012. Т. 56., № 3-4. С. 231-235.

100. Zhongwen X., Hongsheng L., Junjia C., Chunfeng L. NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION INTO HOT STAMPING OF HIGH STRENGTH STEEL SHEET FOR AUTO B PILLAR REINFORCED PANEL // *Advanced Materials Research*. 2010. Т. 129-131., С. 322-327.