

The development of the technology of the cutting teeth plastic forming on the surface of segment instead of milling is presented.

Л. А. ИСАЕВИЧ, Д. М. ИВАНИЦКИЙ, В. А. КОРОЛЬ, БНТУ

УДК 631.3

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ЗУБЬЕВ СЕГМЕНТОВ РЕЖУЩИХ АППАРАТОВ ЗЕРНО- И КОРМОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Сегмент, показанный на рис. 1, относится к режущим аппаратам сегментно-пальцевого и двухножевого типа для подпорного резания.

Режущие грани сегментов бывают гладкими и насеченными. Насечка предотвращает выскальзывание стеблей из раствора режущей пары как при их подводе сегментом к противорежущей пластине, так и при защемлении [1]. Целью исследования является разработка технологии пластического формообразования режущих зубьев на поверхности сегмента взамен фрезерования.

При теоретическом анализе формообразование рельефа в листовом материале будем рассматривать как процесс заполнения впадины деформирующего инструмента деформируемым металлом. Приближенная схема решения основана на усреднении напряжений в сечениях деформируемого листа и принятии упрощенного уравнения пластичности, что соответствует реальному процессу для случаев незначительных значений коэффициента контактного трения на границе металла со стенками впадины и относительно небольших углах наклона граней впадины [2, 3].

Для получения решения профиль впадины представим в виде треугольника (рис. 2, а).

Уравнение равновесия выделенного в деформируемом металле элемента единичной длины для произвольного поперечного сечения впадины запишем в виде

$$-pF + (p + dp)(F + dF) - 2fqdS \cos \alpha - 2qdS \sin \alpha = 0,$$

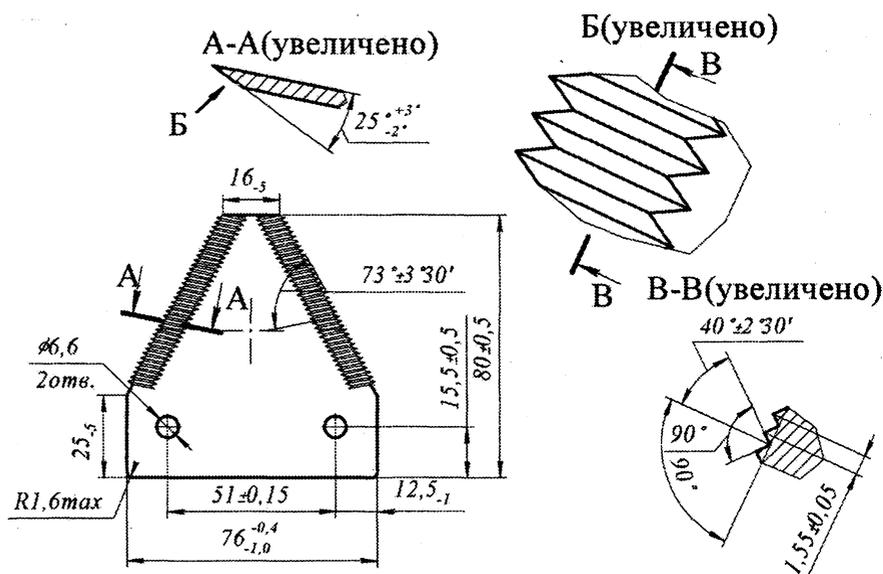


Рис. 1. Сегмент режущих аппаратов сельскохозяйственных машин

где f — коэффициент контактного трения; p — напряжение, действующее в направлении, нормальном к поверхности деформирующего инструмента (по оси y); F — площадь сечения выделенного элемента, которая при длине dy , равной единице, соответствует величине B (B_c — ширина выделенного элементарного сечения на свободной поверхности деформируемого участка металла; B_n — шаг канавок на инструменте); q — напряжение по нормали к стенке впадины; S — площадь боковой поверхности (стенки) впадины в выделенном сечении dy , равная $dS = \frac{dy}{2 \sin \alpha}$; α — угол наклона боковой стенки впадины к оси y .

Преобразуем записанное уравнение к виду

$$d(pF) - 2q(\sin \alpha + f \cos \alpha)dS = 0. \quad (1)$$

Для начала будем считать деформацию в зоне затекания металла во впадину двумерной. Далее принимаем, что главные оси напряжений в рассматриваемом элементе соответствуют вертикальным и горизонтальным осям. Тогда, согласно [4], можно записать

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_T, \quad (2)$$

где
$$\sigma_1 = \frac{\left(q \frac{dy}{\cos \alpha} \cos \alpha - fq \frac{dy}{\cos \alpha} \sin \alpha \right)}{dy};$$

$\sigma_3 = P_y$; β – параметр Лоде; σ_T – предел текучести стали.

На этом основании условие (2) можно записать как $q(1 - fg\alpha) - p = \beta \sigma_T$.

Подставив данное выражение в уравнение (1), получим

$$d(pF) - (p + \beta \sigma_T) \frac{1 + fctg\alpha}{1 - ftg\alpha} dF = 0, \quad (3)$$

а после преобразований имеем

$$\frac{dp}{dF} + \frac{1-C}{F} p = \frac{C\beta\sigma_T}{F}$$

где $C = (1 + fctg\alpha)/(1 - ftg\alpha)$.

В результате решения данного дифференциального уравнения при граничных условиях, согласно которым при $F = F_C$ (т.е. на свободной поверхности деформируемого участка металла) $p = 0$, получим

$$p = \beta \sigma_T \left\{ \frac{C}{1-C} \left[1 - e^{-(1-C)\ln(F_C/F_H)} \right] \right\}. \quad (4)$$

Здесь F_H – площадь сечения выделенного элемента на участке, где расстояние между зубьями на деформирующем инструменте равно номинальному шагу.

В пределе, когда $f \rightarrow \infty$ и $C \rightarrow 1$ после раскрытия неопределенностей выражение (4) примет вид

$$p = \beta \sigma_T \ln \frac{F_H}{F_C}. \quad (5)$$

Анализ последнего выражения показывает, что при полном заполнении металлом впадины, когда $F_C \rightarrow 0$, напряжение $p \rightarrow \infty$. Это возможно в силу принятого вначале допущения о плоской деформации, т.е. без учета возможного перемещения металла вдоль впадины, как это на самом деле и происходит.

Рассмотрим схему заполнения впадины по ее длине. Для этого процесс представим как осадку полосы наклонным бойком (рис. 2, б). Поскольку

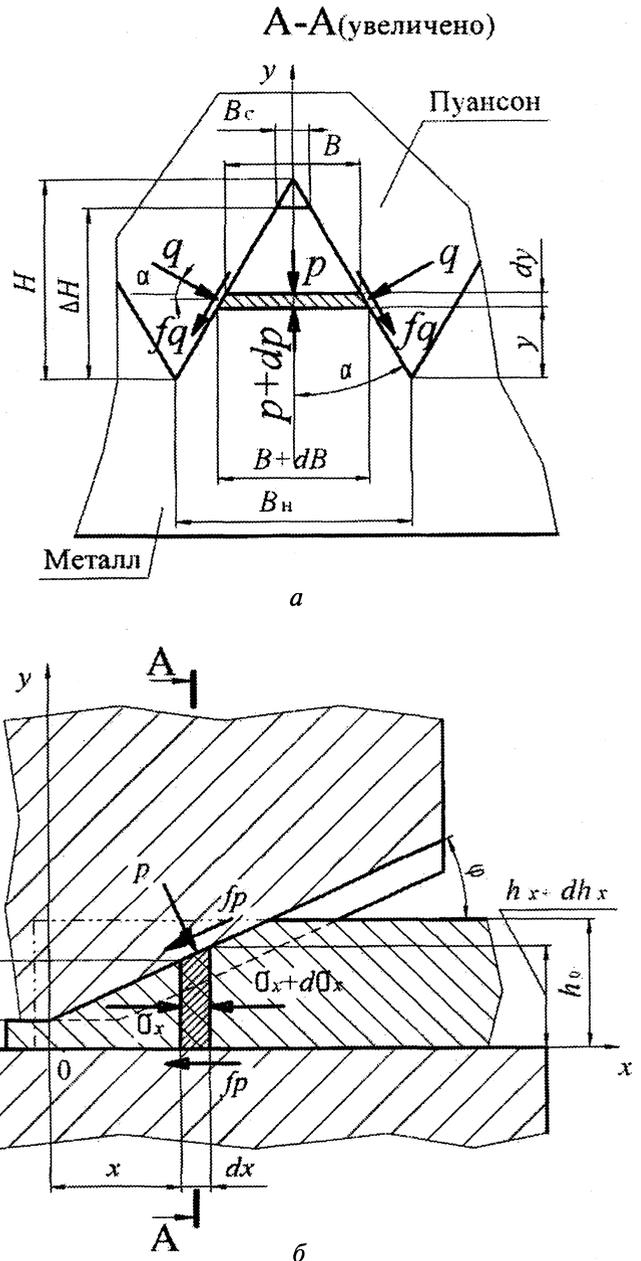


Рис. 2. Схема формообразования рельефной поверхности

в зоне наибольшего обжатия листовой заготовки имеется горизонтальная площадка, то, очевидно, перемещение металла в направлении этой площадки затруднено и вытяжка осуществляется за счет смещения заготовки по направлению оси x .

При отсутствии прижима заготовка приподнимается относительно нижней плиты, занимая положение, при котором очаг деформации становится симметричным (рис. 3). В силу этого оси координат будут повернуты относительно первоначального положения на угол $\varphi/2$ (φ – угол наклона профилированной части деформирующего инструмента к горизонтальной плоскости).

Выделим в очаге деформации бесконечно малый элемент единичной ширины длиной dx , удаленный от начала координат на расстояние x .

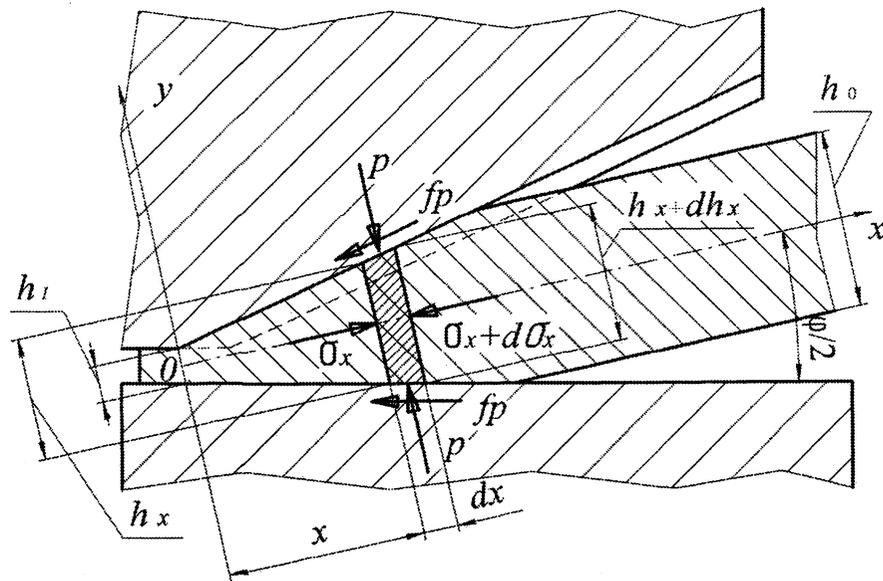


Рис. 3. Схема формообразования рельефа при свободном повороте заготовки

Составим уравнение равновесия этого элемента:

$$-(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) + \sigma_x h_x + 2p \frac{dx}{\cos(\varphi/2)} \times \sin(\varphi/2) - 2fp \frac{dx}{\cos(\varphi/2)} \cos(\varphi/2) = 0.$$

Подставляя в данное уравнение значение $dx = \frac{dh_x}{2 \operatorname{tg}(\varphi/2)}$ и пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка, получаем

$$d\sigma_x - (p - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \frac{fp}{\operatorname{tg}(\varphi/2)} \frac{dh_x}{h_x} = 0. \quad (6)$$

Будем считать, что при штамповке зубьев ширина заготовки не изменяется, так как этому препятствуют рифления на верхнем инструменте. Следовательно, для данной схемы можно принять деформацию плоской.

Далее будем полагать, что главные оси напряжений в рассматриваемом элементе соответствуют осям xOy , поскольку угол $\varphi/2$ сравнительно мал, и, следовательно, можно использовать уравнение пластичности (2), в котором $\sigma_1 = p$, а $\sigma_3 = \sigma_x$. Тогда

$$p - \sigma_x = \beta \sigma_T. \quad (7)$$

Решив его совместно с уравнением (6), получим

$$dp - \beta \sigma_T \frac{dh_x}{h_x} + \frac{fp}{\operatorname{tg}(\varphi/2)} \frac{dh_x}{h_x} = 0. \quad (8)$$

Введем обозначение $\delta = \frac{f}{\operatorname{tg}(\varphi/2)}$ и произведем

преобразования $dp = (\beta \sigma_T - \delta p) \frac{dh_x}{h_x}$. Затем разделим

переменные $\frac{dp}{\beta \sigma_T - \delta p} = \frac{dh_x}{h_x}$ и далее проинтегрируем

полученное выражение $\ln(\delta p - \beta \sigma_T) = -\delta \ln h_x + C$. После этого преобразуем его к виду

$$\delta p - \beta \sigma_T = C h_x^{-\delta}.$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий, в соответствии с которыми при $h_x = h_0$ (толщина заготовки сегмента) параметр $p = \beta \sigma_T$. Тогда запишем

$$C = \beta \sigma_T (\delta - 1) h_0^\delta.$$

Подставив значение постоянной интегрирования в предыдущее выражение, окончательно имеем

$$p = \frac{\beta \sigma_T}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]. \quad (9)$$

Анализ данного уравнения показывает, что с уменьшением величины h_x напряжение p возрастает. Поскольку заполнение впадины осуществляется, согласно (5), исключительно величиной напряжения p , то в соответствии с (9) глубина затекания металла во впадину определяется соотношением

$$\ln \frac{F_H}{F_C} = \frac{1}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right] \text{ или после преобразования}$$

$$F_C = F_H / e^{\frac{1}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]}. \quad (10)$$

Из полученного выражения следует, что с уменьшением значения h_x и соответственно с увеличением обжатия листа величина F_C снижается и, следовательно, глубина затекания металла во впадину возрастает.

Таким образом, по мере приближения к кромке листа глубина рельефа увеличивается, что и наблюдается при экспериментальных исследованиях.

Для определения усилия, необходимого для формообразования рельефа, следует проинтегрировать уравнение (9) в пределах изменения самой функции и в соответствии с [4] можно записать

$$P = \frac{L\beta\sigma_T l}{\Delta h} \int_{h_1}^{h_0} \left[\frac{(\delta-1)}{\delta} \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + \frac{1}{\delta} \right] dh_x,$$

где $l = \frac{h_0 - h_1}{\sin \varphi}$; $\Delta h = h_0 - h_1$; h_1 — толщина облоя

между зубьями, образованными на сегменте; L — длина рельефной кромки заготовки (рис. 4).

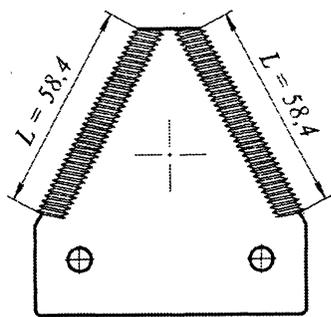


Рис. 4. Схема для определения длины рельефной кромки заготовки

После подстановки величин l и Δh в последнее уравнение запишем

$$P = \frac{L\beta\sigma_T}{\sin \varphi} \int_{h_1}^{h_0} \left[\frac{(\delta-1)}{\delta} \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + \frac{1}{\delta} \right] dh_x.$$

Интеграл имеет два решения в зависимости от величины δ :

при $\delta \neq 1$

$$P = \frac{L\beta\sigma_T}{\sin \varphi} \frac{h_1}{\delta} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta - 1 \right]; \quad (11)$$

при $\delta = 1$

$$P = \frac{L\beta\sigma_T}{\sin \varphi} (h_0 - h_1).$$

В расчетах необходимо учитывать упрочнение металла, которое характеризуется напряжением текучести σ_S для любого момента деформации до начала образования шейки. Напряжение текучести определим по формуле Губкина [5]:

$$\sigma_{S_1} = \sigma_T + \left(\frac{\sigma_B}{1 - \psi_{Ш}} - \sigma_T \right) \times \left(\frac{\psi}{\psi_{Ш}} \right)^{\frac{\sigma_B \cdot \psi_{Ш}}{(\sigma_B - \sigma_T)(1 - \psi_{Ш})}}, \quad (12)$$

где σ_T — для стали 65Г равен 410 МПа [6]; σ_B — предел прочности исходного материала для стали 65Г, равный 690 МПа [6]; $\psi_{Ш}$ — относительное изменение площади поперечного сечения образца в момент образования шейки, для стали 65Г принимаем равным значению 35% [6]; ψ — относительное уменьшение площади поперечного сечения.

Относительное уменьшение площади поперечного сечения определим по формуле

$$\psi = 1 - \frac{F_0 - F}{F_0}, \quad (13)$$

где F_0 — площадь сечения канавок для расчетов; F — площадь сечения, заполненная металлом после деформирования.

При внедрении пуансона в заготовку сегмента объем металла с площадью сечения F_0 (рис. 5) перемещается и заполняет впадину, площадь сечения которой F .

В теоретических расчетах целесообразно использовать осредненное значение напряжения текучести, которое находим по формуле [5]:

$$\sigma_S^* = \frac{\sigma_S + \sigma_{S_1}}{2}, \quad (14)$$

где σ_S — напряжение текучести стали в исходном состоянии, равное 410 МПа.

При определении полного усилия деформирования также необходимо учитывать ту его часть, которая приходится на осадку облоя, образующегося на краю заготовки. Этот процесс представим как осадку полосы неограниченной длины и запишем выражение для определения усилия [7]:

$$P_{обл.} = \sigma_{S_1} \frac{h_1}{f} \left(e^{\frac{fL}{2h_1}} - 1 \right). \quad (15)$$

В выражении (15) не учитывается длина полосы толщиной h_1 и шириной L (рис. 6). В теоретических расчетах принимаем длину полосы a , равной 0,5 мм. С учетом этого последнее выражение примет вид

$$P_{обл.} = \sigma_{S_1} \frac{h_1}{f} \left(e^{\frac{fL}{2h_1}} - 1 \right) a. \quad (16)$$

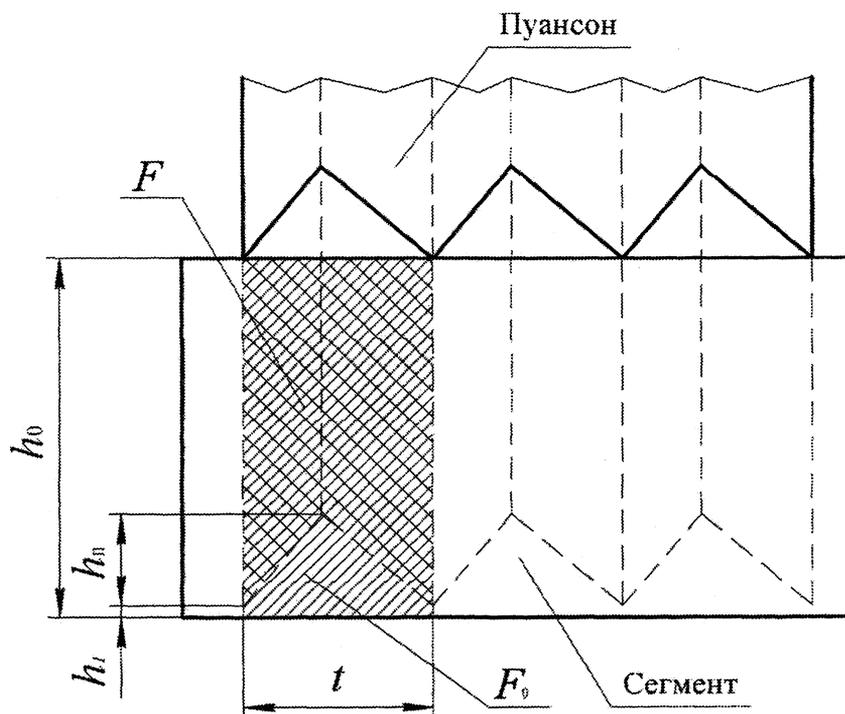


Рис. 5. Схема для определения степени деформации

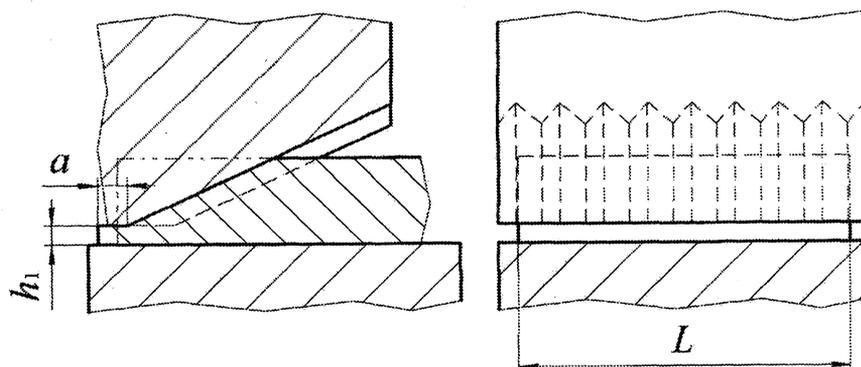


Рис. 6. Схема для определения усилия осадки облоя

Полное усилие формообразования зубьев на сегменте $P_{\text{полн.}}$ будет равно сумме усилий формирования зуба P и осадки облоя $P_{\text{обл.}}$.

Для теоретических расчетов примем следующие значения параметров: глубина канавки на инструменте $h_n = 0,763$ мм (см. рис. 5); ширина канавки $t = 1,55$ мм (см. рис. 5); угол наклона профилированной части деформирующего инструмента к горизонтальной плоскости $\varphi = 25^\circ$; параметр Лоде $\beta = 1,15$ [5].

Результаты проведенных расчетов полного усилия деформирования сегментов с использованием выражений (11) и (16) приведены на рис. 7.

Анализируя далее полученные зависимости и принимая во внимание силовые параметры кузнечно-прессового оборудования, а именно криво-

шипно-коленный чеканочный пресс усилием 4000 кН, определяем возможную толщину облоя h_1 у готовых сегментов. Поскольку в расчетах учитывалась только одна из двух кромок сегмента с насечкой (см. рис.4), в качестве исходного параметра принимаем $P_{\text{полн.}} = 2000$ кН. Полученные значения толщины облоя приведены в таблице.

Экспериментальные исследования по формообразованию режущих зубьев сегментных ножей холодным пластическим деформированием проводили на заготовках толщиной 3 мм по схеме штамповки, показанной на рис. 8.

В соответствии с данной схемой исходные заготовки сегментных ножей могут быть установлены в трех различных положениях относительно деформирующего пуансона (на некотором расстоянии от условной центральной осевой линии 0-0, проходящей по центру пуансона):

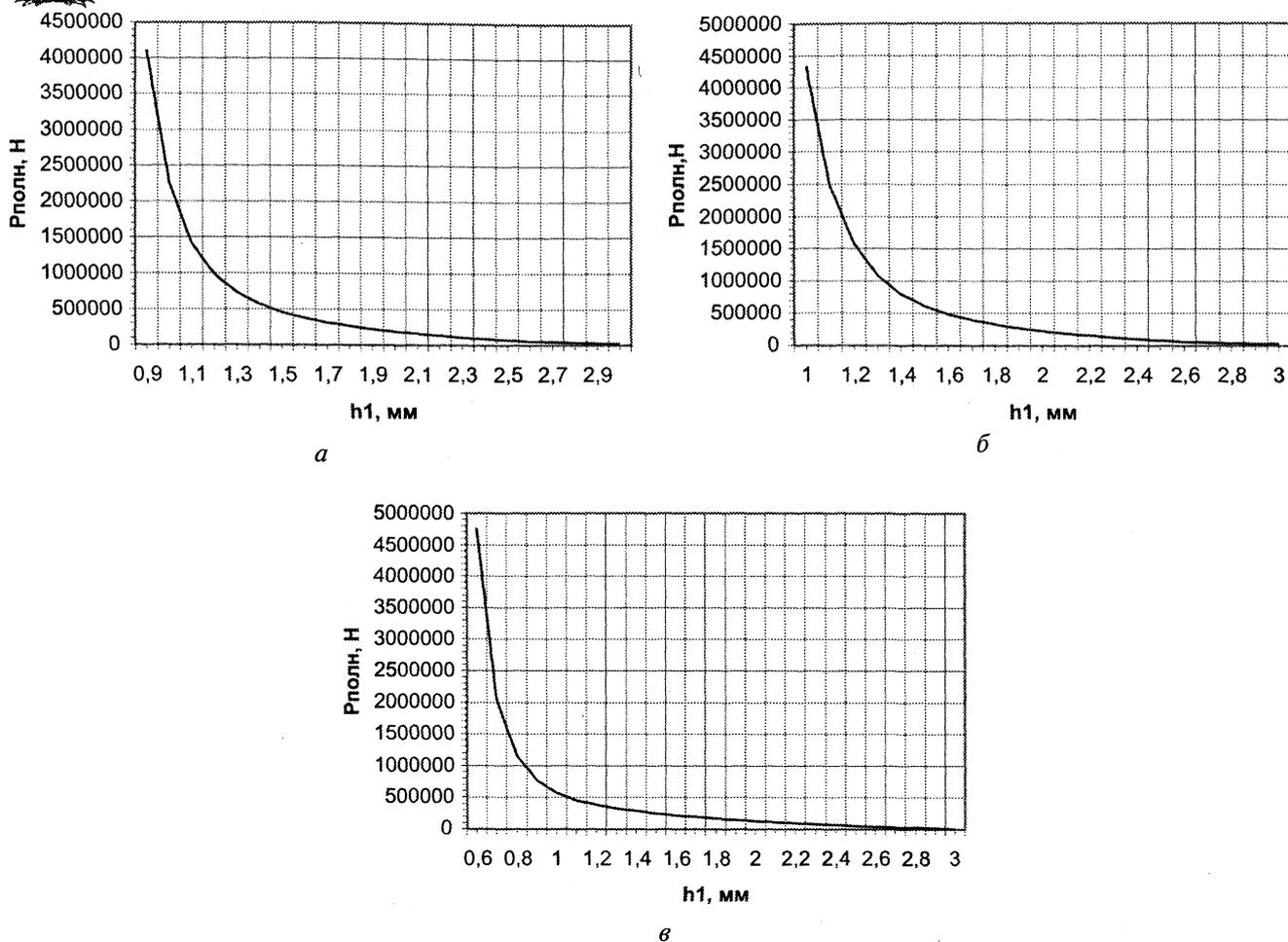


Рис. 7. Зависимости полного усилия $P_{\text{полн}}$ от толщины облоя h_1 при разных δ : а – при $\delta = 1$; б – при $\delta > 1$; в – при $\delta < 1$

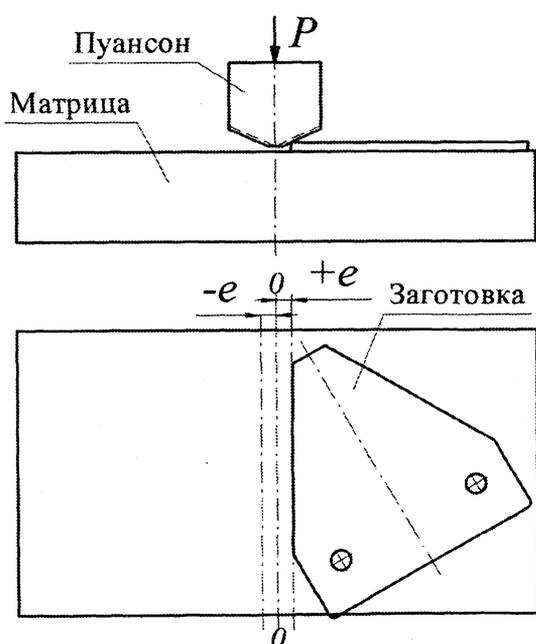


Рис. 8. Схема экспериментального штампа

а) на расстоянии $-e$ кромки заготовки, на которой будут формироваться зубья, от линии 0–0 (рис. 8);

б) по линии 0–0, т.е. $e=0$;

в) на расстоянии $+e$ от линии 0–0.

Исследования проводили на лабораторном гидравлическом прессе усилием 2000 кН. Результаты экспериментов по формообразованию режущих зубьев сегментных ножей пластическим деформированием на заготовках из стали 65Г приведены в таблице.

По результатам формообразования зубьев сегментных ножей на заготовках из стали 65Г следует отметить, что заполнение профиля зуба происходит при установке заготовки на расстоянии $e = +1,5$ мм (для сегмента толщиной 3 мм). Проведенные эксперименты показали, что при толщине облоя от 1,0 до 1,1 мм экспериментальные и теоретические усилия деформирования практически одинаковы, причем теоретические несколько меньше. Это вполне согласуется с физическими представлениями о механизме деформирования, поскольку в расчетах был использован метод нижней оценки (метод плоских сечений). Однако при толщине облоя менее 1,0 и

Экспериментальные значения параметров процесса формообразования зубьев на заготовках сегментов из стали 65Г

Номер образца	Положение заготовки (-e, +e), мм	Усилие прессования, кН			Толщина заготовки, мм	Степень заполняемости профиля зуба	Толщина облоя экспериментальная, мм
		теоретическое		экспериментальное			
		при разных δ	среднее				
1	+2,5	при $\delta < 1$ 382,9	981,6	1700	3,0	Профиль заполнен	1,2
		при $\delta = 1$ 985,1					
		при $\delta > 1$ 1576,8					
2	+2,5	при $\delta < 1$ 459,1	1453,4	1800	3,0	Профиль заполнен	1,1
		при $\delta = 1$ 1425,6					
		при $\delta > 1$ 2475,4					
3	+2,0	при $\delta < 1$ 422,0	1182,6	1800	3,0	Профиль заполнен	1,15
		при $\delta = 1$ 1173,3					
		при $\delta > 1$ 1952,5					
4	+2,0	при $\delta < 1$ 574,4	2393,5	1900	3,0	Профиль заполнен	1,0
		при $\delta = 1$ 2268,8					
		при $\delta > 1$ 4337,4					
5	+1,5	при $\delta < 1$ 328,0	715,5	1600	3,0	Профиль заполнен	1,3
		при $\delta = 1$ 728,7					
		при $\delta > 1$ 1089,9					
6	+1,5	при $\delta < 1$ 357,1	832,6	1700	3,0	Профиль заполнен	1,25
		при $\delta = 1$ 841,2					
		при $\delta > 1$ 1299,6					
7	+1,5	при $\delta < 1$ 411,0	1136,6	1800	3,0	Профиль заполнен	1,16
		при $\delta = 1$ 1131,3					
		при $\delta > 1$ 1867,5					
8	+1,5	при $\delta < 1$ 574,4	2393,5	1900	3,0	Профиль заполнен	1,0
		при $\delta = 1$ 2268,8					
		при $\delta > 1$ 4337,4					

более 1,1 мм увеличивается разница между расчетными и экспериментальными усилиями. Из этого можно сделать вывод, что на практике необходимо штамповать сегменты с облоем толщиной не менее 1,0 мм.

Литература

1. Сельскохозяйственные машины / И.С. Иванов, К.И. Лиходенко, М.Я. Резниченко, Г.Г. Чернов. М.: Машиностроение, 1970.
2. Отпечатываемость шероховатости валков на полосе при холодной прокатке и дрессировке / Б.П. Колесниченко,

В.Л. Мазур, А.П. Качайлов // Листопрокатное производство. 1972. № 1. С. 76–80.

3. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. Киев: Техника, 1982.
4. Теория продольной прокатки / А.Я. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. М.: Металлургия, 1980.
5. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. М.: Высш. шк., 1963.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т.1. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980.
7. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1978.