

УДК 631.7/9.016

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ
ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ЗУБЬЕВ СЕГМЕНТОВ
РЕЖУЩИХ АППАРАТОВ ЗЕРНО- И КОРМОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ**

*Докт. техн. наук, проф. ИСАЕВИЧ Л. А., инж. ИВАНИЦКИЙ Д. М.,
докт. техн. наук КОРОЛЬ В. А.*

Белорусский национальный технический университет

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

Насечка предотвращает выскальзывание стеблей из раствора режущей пары как при их подводе сегментом к противорежущей пластине, так и при заземлении. В условиях промышленного производства на РУП «Светлогор-

ский завод сельскохозяйственного машиностроения «Светлогорскормаш» впадины периодического характера на режущих гранях сегмента получают фрезерованием. Цель проведенных исследований – разработка технологии формообразования режущих зубьев на поверхности сегмента пластическим деформированием вместо фрезерования.

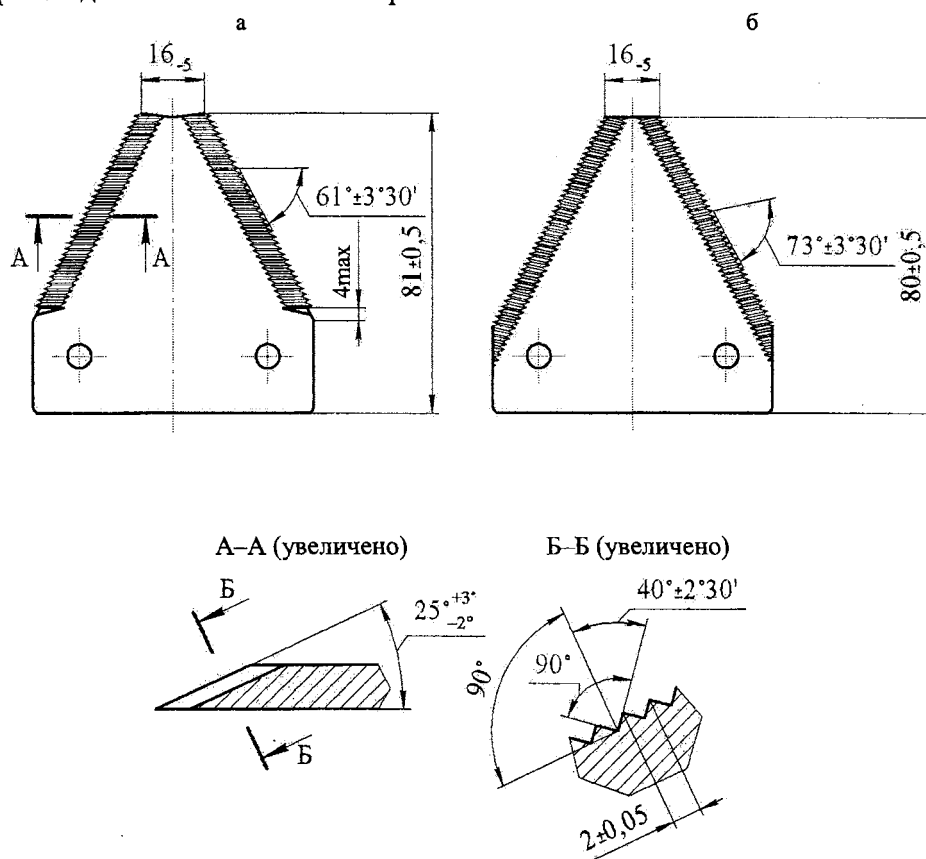


Рис. 1. Варианты исполнения насечки на сегменте

Для обеспечения самозатачивания во время работы сегмента направление нанесения зубьев должно совпадать со средним направлением движения стебля в процессе перерезания относительно сегмента. Шаг и углы наклона лезвий зубьев насечки должны быть такими, чтобы в резании участвовало минимальное число зубьев насечки, обеспечивающих устойчивое защемление, и выполнялось условие врезания сегмента в стебель.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований была усовершенствована конструкция сегмента. Угол наклона насечки к боковой грани с 73° у фрезерованных ножей (рис. 1б) уменьшен до 61° (рис. 1а). При фрезеровании зубья располагаются и на прямоугольном участке сегмента (хвостовике). Но так как они перекрываются линейками и не участвуют в процессе резания, а также из технологических соображений насечка заканчивается на расстоянии 4 мм до хвостовика (рис. 1а). Шаг между зубьями увеличен от 1,5 до 2,0 мм.

Это обусловлено тем, что при шаге 1,5 мм преобладает износ вершин зубьев. С увеличением шага характер износа меняется, т. е. преобладает износ впадин. При малом шаге по отношению к диаметру стебля в месте среза в перерезании участвует большее число зубьев и соответственно увеличивается количество циклов их нагружения. Кроме того, участие в резании большего числа зубьев приводит к повышению деформации стебля и тем самым к невыполнению условий врезания [1].

С увеличением шага t до 2,0 мм (рис. 2) в перерезании участвуют только два соседних зуба. При шаге $t = 2,0$ мм и угле наклона лезвий зубьев к направлению движения сегмента $\gamma = 20-45^\circ$ выполняется условие врезания. При этих параметрах происходит наибольшее заострение зуба, поскольку износ впадин и вершин равен, и следовательно, относительный износ зуба по высоте равен нулю.

При шаге более 2,0 мм условие врезания нарушается и стебель перерезается между двумя зубьями. В этом случае стебель значительно деформируется, скользя по зубьям, что вызывает их повышенный износ. Оптимальными параметрами при диаметре $d = 4$ мм стебля 3 (рис. 2) следует считать шаг насечки $t = 2,0$ мм и угол наклона лезвий зубьев $\gamma = 20-45^\circ$ [1].

Во фрезерованном сегменте 2 (рис. 2) шаг насечки равен 1,55 мм, а угол наклона лезвий зубьев к направлению движения сегментов составляет $33^\circ 38'$. По новой технологии пара-

метры равны соответственно: $t = 2,0$ мм и $\gamma = 22^\circ 35'$.

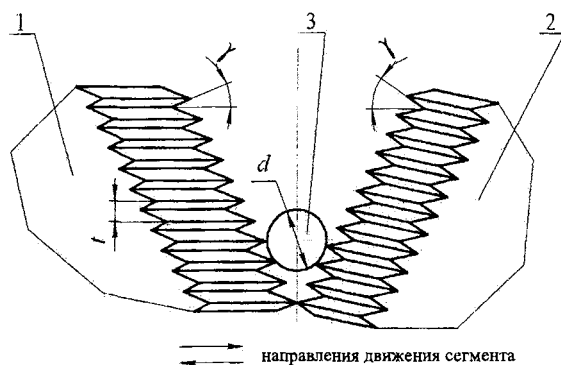


Рис. 2. Схема процесса резания

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].

Рассмотрим процесс заполнения впадины по высоте (рис. 3).

Для получения решения профиль впадины представим в виде треугольника. Напряжение, возникающее в металле при затекании во впадину, будет определяться по выражению [2]

$$p = \beta \sigma_{\tau} \ln \frac{F_n}{F_c} \quad (1)$$

где F_c – площадь свободной поверхности деформируемого металла, равная $B_c \times 1$; $F_n = B_n \times 1$ – площадь сечения на участке, где расстояние между зубьями на деформирующем инструменте равно номинальному шагу (рис. 3).

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.

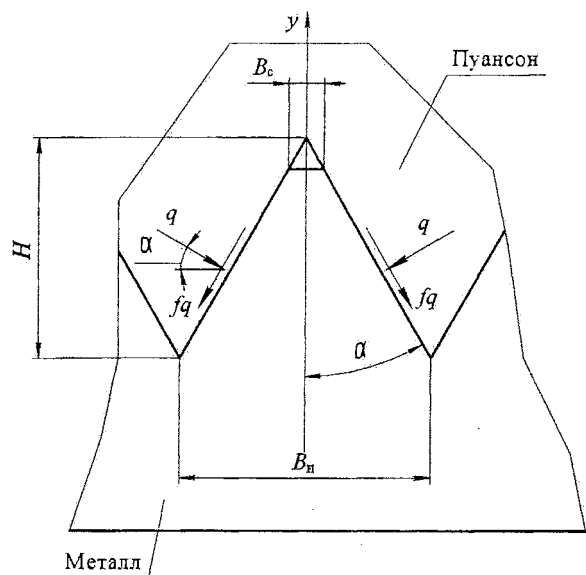


Рис. 3. Схема формообразования рельефной поверхности

Рассмотрим схему заполнения впадины по ее длине. Для этого процесс представим как осадку полосы наклонным бойком (рис. 4). Поскольку в зоне наибольшего обжатия листовой заготовки имеется горизонтальная площадка, очевидно, что перемещение металла в направлении этой площадки затруднено и вытяжка осуществляется за счет смещения заготовки по направлению оси x .

Напряжение, возникающее в металле при заполнении впадины по длине, можно рассчитать по выражению [2]

$$p = \frac{\beta \sigma_T}{\delta} \left[(\delta - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]. \quad (2)$$

Анализ данного уравнения показывает, что с уменьшением величины h_x напряжение p возрастает. Выражение для определения усилия формообразования рельефа имеет вид [2]

$$P = \frac{L \beta \sigma_T h_1}{\sin \varphi \delta} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (3)$$

где φ – угол наклона профилированной части деформирующего инструмента к горизонтальной плоскости; β – параметр Лоде; σ_T – предел текучести стали; h_0 – толщина заготовки сегмента; h_1 – толщина перемычки между зубьями, образованными на сегменте; L – длина рельефной кромки заготовки; параметр $\delta = \frac{f}{\operatorname{tg}(\varphi/2)}$, где f – коэффициент контактного трения.

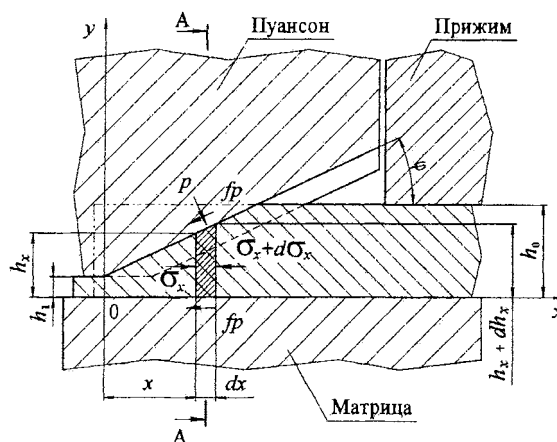


Рис. 4. Схема заполнения впадины по длине заготовки

В расчетах необходимо учитывать упругие свойства металла, которое характеризуется напряжением текучести σ_S для любого момента деформации до начала образования шейки. Напряжение текучести определим по формуле С. И. Губкина [3]

$$\sigma_{S1} = \sigma_T + \left(\frac{\sigma_B}{1 - \psi_m} - \sigma_T \right) \left(\frac{\psi}{\psi_m} \right)^{\frac{\sigma_B \psi_m}{(1 - \psi_m)(\sigma_B - \sigma_T)(1 - \psi_m)}}, \quad (4)$$

где σ_T – для стали 65Г равен 410 МПа [4]; σ_B – предел прочности исходного материала, для стали 65Г равен 690 МПа [4]; ψ_m – относительное изменение площади поперечного сечения образца в момент образования шейки, для стали 65Г принимаем равным значению 35 % [4]; ψ – относительное уменьшение площади поперечного сечения.

Относительное уменьшение площади поперечного сечения определим по формуле [2]

$$\psi = 1 - \frac{F_0 - F}{F_0}, \quad (5)$$

где F_0 – площадь сечения канавок для расчетов; F – то же, заполненная металлом после деформирования.

В теоретических расчетах использовали осредненное значение напряжения текучести, которое определяется по формуле [3]

$$\sigma_S^* = \frac{\sigma_S + \sigma_{S1}}{2}, \quad (6)$$

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 перемычки [2]:

$$P_{обл} = \sigma_{s1} \frac{h_1}{f} \left(e^{\frac{f}{2h_1}} - 1 \right) a. \quad (7)$$

Усилие прижима заготовки найдем по выражению [5]

$$P_{пр} = 0,1P_{полн}.$$

Усилие формообразования зубьев на сегменте составит

$$P_{полн} = P + P_{обл} + P_{пр}. \quad (8)$$

На основе формулы (8) были проведены теоретические расчеты, а на основе экспериментальных исследований процесса пластического формообразования зубьев получены опытные данные. По результатам исследований построены зависимости полного усилия штамповки от толщины перемычки (рис. 5).

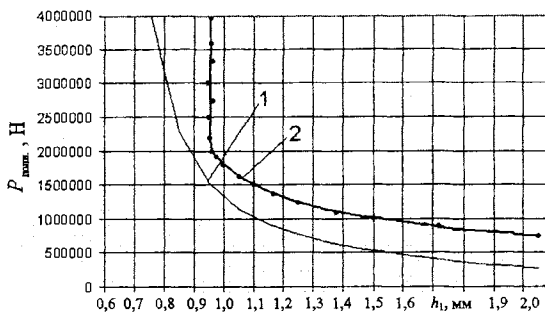


Рис. 5. График зависимости полного усилия $P_{полн}$ от толщины перемычки h_1 : 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Экспериментальные исследования по формообразованию режущих зубьев сегментных ножей холодным пластическим деформированием проводили на заготовках толщиной 3 мм по схеме штамповки (рис. 6). Исследования осуществляли на лабораторном гидравлическом прессе усилием 2000 кН.

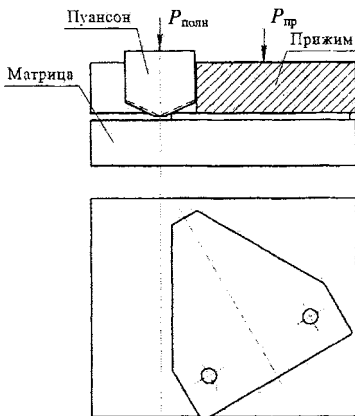


Рис. 6. Схема экспериментального штампа

Анализируя полученные графики и принимая во внимание силовые параметры кузнечно-прессового оборудования, а именно кривошип-

но-коленный чеканочный пресс КР 8336 усилием 4000 кН, определим возможную толщину перемычки h_1 у готовых сегментов. Поскольку при экспериментальных исследованиях использовали пресс усилием 2000 кН, расчет и опыты проводили для одной режущей кромки сегмента. Полученные значения теоретической и экспериментальной толщины перемычки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Теоретические и экспериментальные результаты исследований процесса формообразования зубьев на заготовках сегментов из стали 65Г

№ образца	Усилие прессования экспериментальное, кН	Степень заполнения профиля	Толщина заготовки, мм	Толщина перемычки, мм	
				теоретическая	экспериментальная
1	2000	Заполнен	3,1	0,835	0,9
2	1800	Заполнен	3,1	0,855	0,93
3	1625	Заполнен	3,05	0,89	1,0
4	1500	Заполнен	3,05	0,916	1,05
5	1375	Заполнен	3,05	0,934	1,11
6	1250	Заполнен	3,05	0,97	1,2
7	1125	Незаполнен	3,05	1,02	1,32
8	1000	Незаполнен	3,1	1,07	1,45
9	875	Незаполнен	3,1	1,13	1,68
10	750	Незаполнен	3,1	1,21	2,2
11	625	Незаполнен	3,1	1,33	2,5
12	500	Незаполнен	3,1	1,5	2,8

Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы. На имеющемся в наличии оборудовании по данной схеме штамповки невозможно получать изделия с толщиной перемычки между зубьями менее 0,9 мм (табл. 1), что является существенным недостатком для новой технологии.

Теоретические значения толщины перемычки несколько меньше экспериментальных. Это вполне согласуется с физическими представлениями о механизме деформирования, поскольку в расчетах был использован метод нижней оценки (метод плоских сечений).

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать на РУП «Светлогорскорммаш» новую промышленную технологию, включающую:

- отрезку полосы из листа;
- вырубку-пробивку заготовок;
- правку заготовок (при необходимости);
- фрезерование уклона на грани;
- фрезерование насечки;
- термообработку (закалку, отпуск);
- технический контроль.

По новой технологии исключаются операции фрезерования уклона и насечки и вводятся операции штамповки и шлифования (заточки).

Это позволяет, во-первых, полностью ликвидировать механическую обработку (фрезерование режущих зубьев ножей) и затраты на возмещение износа фрез.

Во-вторых, наличие перемычки между зубьями исключает при термообработке интенсивное окисление и обезуглероживание режущих кромок зубьев, что увеличивает их износостойкость и долговечность.

В сконструированном штампе процесс деформирования осуществляется по схеме, приведенной на рис. 7. Эта схема позволяет за один ход ползуна прессы получать готовый полуфабрикат сегмента с насеченным лезвием. Штамп также оснащен прижимом для предотвращения изгиба заготовки. В процессе штамповки сегмент, предварительно уложенный на плоской матрице по упорам, более точно самоустанавливается пуансонами. Это обеспечивается наклонными гранями самих пуансонов.

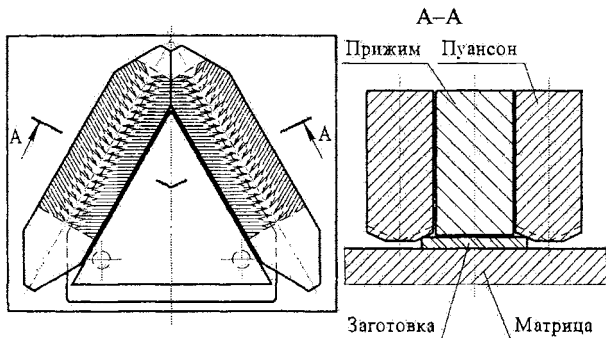


Рис. 7. Схема штамповки насечки на сегменте

Как отмечалось, при штамповке по данной схеме толщина перемычки между зубьями не может быть менее 0,9 мм. После шлифовки этой перемычки толщина сегмента выходит за пределы допуска. Для получения качественного изделия шлифовать необходимо на величину 0,3–0,35 мм. Поэтому следует определить величину смещения кромки заготовки e от центра пуансона. Значение смещения найдем по смещенному объему из условия, что металл заготовки V_0 заполнит только впадину V_1 и не потечет под плоские участки пуансона Б (рис. 8). Параметр e определим из условия

$$V_0 = V_1, \quad (9)$$

где V_0 – объем смещенного металла заготовки; V_1 – объем впадины пуансона, заполняемый металлом.

Определим значения составляющих выражения (9):

$$V_0 = -z^3 \frac{(\operatorname{tg}\varphi)^2(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{6} + z^2 \frac{(h_0 - h_1)\operatorname{tg}\alpha(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{2} +$$

$$+ z \frac{(h_0 - h_1)^2(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{2} + \frac{(h_0 - h_1)^3(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{6\operatorname{tg}\varphi}; \quad (10)$$

$$V_1 = z^3 \frac{(\operatorname{tg}\varphi)^2(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{6} + z^2 \frac{h_1 \operatorname{tg}\varphi(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{2} + z \frac{h_1^2(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{ctg}\alpha)}{2}, \quad (11)$$

где α – угол наклона боковой стенки впадины к вертикальной оси, равный 40° ; φ – угол наклона профилированной части деформирующего инструмента к горизонтальной плоскости, равный 25° ; h_0 – толщина заготовки сегмента, равная 3 мм; h_1 – толщина вершины зуба, принимаемая 0,3 мм; z – искомая глубина затекания металла во впадину инструмента по длине (рис. 8).

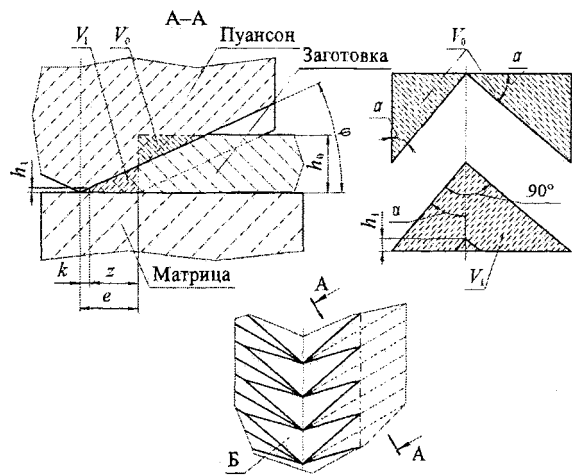


Рис. 8. Схема для расчета смещенного объема

Из (10) вычтем (11) и после преобразований и подстановки численных значений параметров получим кубическое уравнение $-0,147z^3 + 1,136z^2 - 7,494z + 14,287 = 0$. Решив последнее уравнение, найдем $z = 2,57$ мм. Окончательно определим: $e = z + k = z + \frac{h_1}{\operatorname{tg}\varphi} = 3,2$ мм

(рис. 8). При настройке штампа и штамповке заготовка должна быть смещена от центра пуансона на расстояние не менее 3,2 мм.

Сегменты, полученные по новой технологии и с фрезерованной насечкой, были подвергнуты сравнительным полевым испытаниям. Натурные испытания проводили на испытательной станции РКУП «ГСКБ по зерноуборочной и кормоуборочной технике». Два типа сегментов были установлены на режущий аппарат жатки КИС 0200000Б комбайна КСК-100А-2. Испытания проводились по следующей методике [1]:

1. Проверка всех сегментов на твердость.

На рис. 9 на сегменте указана зона упрочнения термообработкой и точки для контроля

твердости. Как видно из рисунка, твердость должна составлять 40–62 HRC.

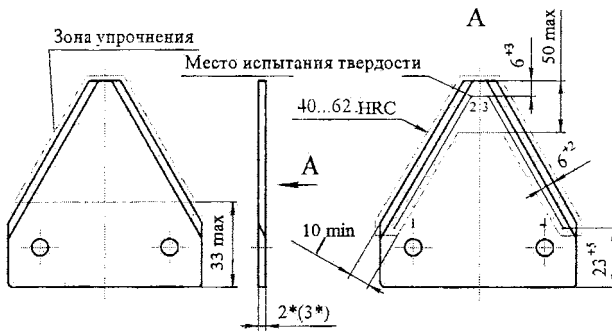


Рис. 9. Расположение участков контроля твердости

2. Изучение характера и величины износа зуба насечки путем сравнения профиля зуба до и после испытаний. Износостойкость оценивается по следующим показателям:

а) относительный износ зуба по высоте

$$U = \frac{l_{\text{ср.нов}} - l_{\text{ср.изн}}}{l_{\text{ср.нов}}}, \quad (12)$$

где $l_{\text{ср.изн}}$ – средняя высота зуба насечки после испытаний; $l_{\text{ср.нов}}$ – то же до испытаний;

б) относительное заострение вершин зубьев насечки

$$a = \frac{r_{\text{ср.верш.нов}} - r_{\text{ср.верш.изн}}}{r_{\text{ср.верш.нов}}}, \quad (13)$$

где $r_{\text{ср.верш.нов}}$ – средний радиус вершин зубьев насечки нового сегмента; $r_{\text{ср.верш.изн}}$ – то же после испытаний;

в) относительный износ впадин между зубьями насечки

$$b = \frac{r_{\text{ср.впад.нов}} - r_{\text{ср.впад.изн}}}{r_{\text{ср.впад.нов}}}, \quad (14)$$

где $r_{\text{ср.впад.изн}}$ – средний радиус впадин между двумя зубьями насечки после испытаний; $r_{\text{ср.впад.нов}}$ – то же до испытаний;

г) относительное притупление лезвий зубьев насечки

$$c = \frac{\delta_{\text{ср.изн}} - \delta_{\text{ср.нов}}}{\delta_{\text{ср.нов}}}, \quad (15)$$

где $\delta_{\text{ср.изн}}$ – средняя острота лезвия зуба насечки после испытаний; $\delta_{\text{ср.нов}}$ – то же до испытаний.

3. Контроль качества среза. На площадке $0,5 \times 0,5 = 0,25 \text{ м}^2$ подсчитывается количество стеблей прямо, косо срезанных и с рваным сре-

зом. Качество среза оценивается чистотой среза, т. е. отношением количества прямо, косо срезанных стеблей к общему количеству стеблей.

Результаты полевых сравнительных испытаний сегментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование параметров	Значение параметра (среднее)		
	По КД	Серийные	Опытные
1. Твердость HRC	40–62	50–57	50–57
2. Относительный износ зуба по высоте U	–	0,004	0,002
3. Относительное заострение вершин зубьев насечки a	–	0,03	0,01
4. Относительный износ впадин между зубьями насечки b	–	0,03	0,02
5. Относительное притупление лезвий зубьев насечки c	–	0,02	0,01
6. Качество среза	–	0,922	0,973

ВЫВОД

Формообразование режущих зубьев сегментных ножей пластическим деформированием повышает их стойкость в 1,5–2 раза за счет увеличения ширины режущей кромки и глубины режущих выступов, а наличие перемычки между зубьями исключает при термообработке интенсивное окисление и обезуглероживание режущих кромок зубьев. Это обеспечивает также возможность выполнения 3–4-кратной переточки сегментов, что исключено при фрезеровании режущих зубьев. Данные преимущества обеспечат экономию дорогостоящей стали 65Г в количестве около 250,0 т в год. При стоимости 1 т указанной марки стали 635000 руб экономия металла составит в среднем 158,7 млн руб в год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резник И. Е. Повышение износостойкости и долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин // Материалы второй науч.-техн. конф. / Под ред. И. Е. Резника. – М., 1971.
2. Исаевич Л. А. Способ получения зубьев сегментов режущих аппаратов зерно- и кормоуборочной техники пластическим деформированием / Л. А. Исаевич, Д. М. Иваницкий, В. А. Король // Литье и металлургия. – 2005. – № 4. – С. 122–128.
3. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Высш. шк., 1963. – 390 с.
4. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – Т. 1. – 728 с.
5. Романовский В. П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.