

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПОКРЫТИЕ- ОСНОВА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ НАПЛАВКЕ

Л. М. Кожуро, докт. техн. наук, профессор, А.В. Миранович, ассистент, В.В. Тризна, инженер, Ю.В. Немизанский, магистрант (УО БГАТУ)

АННОТАЦИЯ

Представлены физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН порошков и результаты численных исследований влияния теплонапряженности процесса и химического состава порошков на величину остаточных напряжений. Численные исследования проверены экспериментально рентгеноструктурным анализом.

В результате исследований установлено, что при ЭМН в покрытиях формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту деформаций в системе покрытие-основа. При этом изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5 ... 1,8 раза. По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятными для эксплуатационных условий будут покрытия из порошка X18FN2M, которые имеют наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

Введение

При восстановлении изношенных деталей различными видами наплавки в системе покрытие-основа возникают и перераспределяются остаточные напряжения. Это происходит из-за металлургической природы образования покрытий, использования легирующих элементов, значительного теплового воздействия на основной металл, быстрого и неравномерного охлаждения наплавленной детали, а также последующей механической обработки восстанавливаемой поверхности в сочетании с различными видами упрочнения [1].

Остаточные напряжения в системе покрытие-основа существенно влияют, прежде всего, на усталостную прочность деталей при циклических нагрузках последних, оказывают определенное влияние на износостойкость рабочих поверхностей деталей и их коррозионную активность.

Доказано [2 ... 4], что остаточные напряжения сжатия полезны, и их обоснованно считают резервом повышения прочности деталей, а напряжения растяжения ослабляют их прочность, вызывают возникновение трещин, приводят к разрушениям.

Остаточные напряжения, возникающие при формировании покрытия – это один из основных факторов, определяющих адгезию покрытия с основой. Однако измеряемая величина адгезии включает в себя величину остаточных напряжений, что не позволяет произвести их точную оценку.

В свою очередь, следует отметить сложность

задачи математического описания процесса формирования остаточных напряжений из-за его дискретного характера, наличия пор, различия физико-механических свойств материалов покрытия и основы, наличия переходной зоны и т.д. Решение этой задачи в полной постановке вряд ли возможно в ближайшем будущем [5]. Именно это и определяет актуальность разработки инженерных методов расчета напряжений, основанных на упрощениях реальной картины образования напряжений.

Основная часть

При электромагнитной наплавке (ЭМН) композиционных порошков в системе покрытие-основа имеют место все три вида напряжений (напряжения I, II и III рода), но причиной нарушения прочности покрытия, появления трещин являются напряжения I рода. Поэтому в имеющихся экспериментальных и теоретических работах изучаются в первую очередь эти напряжения. Покрытия в первом приближении рассматриваются как сплошная среда, что может быть оправдано невысокой их пористостью. Это существенно упрощает задачу и позволяет проводить расчеты в рамках разработанных теорий механики сплошной среды (сопротивления материалов, теорий упругости, пластичности и др.), хотя, конечно же, и вносит определенные погрешности в результаты расчета. Однако для инженерной практики такой подход во многих случаях может быть оправданным исходя из возможности создания относительно простых программных средств, реализующих модели

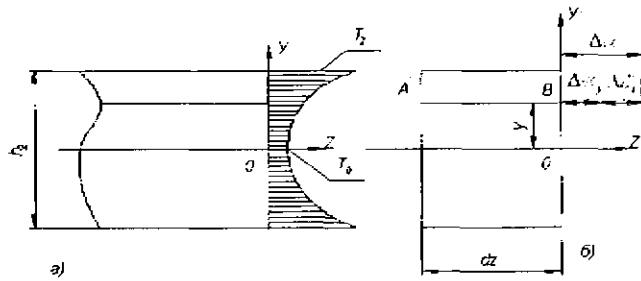


Рис. 1. Схема распределения температуры по высоте стержня и деформация этого стержня от температуры

и их уточнение по результатам экспериментов.

Ввиду того, что процесс наплавки протекает непродолжительное время, будем считать, что температурное поле является постоянным в направлении продольной оси стержня Z (рис. 1). Температура изменяется по высоте стержня, в направлении оси Y, и остается постоянной по его ширине, в направлении оси X.

В процессе наплавки при некоторой температуре T на стержень попадают капли расплава, которые при соприкосновении с поверхностью этого стержня быстро остывают, и к моменту соединения покрытия с основой и при частичной диффузии в основу, температура поверхности стержня будет $T_2 = 150 \dots 250^\circ\text{C}$. Следовательно, на внешней поверхности стержня и в покрытии можно принять расчетную температуру нагрева, равную T_2 (рис. 1, а). К центру заготовки температура интенсивно снижается, так как продолжительность наплавки небольшая.

Если записать уравнение теплопроводности для прямоугольного стержня, то, решив его, можно найти распределение температуры по высоте. Проведенные опыты показали, что с достаточной точностью распределение температуры по высоте можно представить зависимостью

$$T(y) = T_0 + T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n, \quad (1)$$

где T_0 — температура в центре стержня (при $y = 0$);

$$T_2^* = T_2 - T_0, \quad T_2^* \text{ — температура при } |y| = h_2/2;$$

n — положительное число.

Чем больше n , тем больше перепад температуры. От неравномерного распределения температуры в стержне будут возникать напряжения. Эти напряжения будем называть напряжениями наплавки и обозначать σ_H . Определим эти напряжения. Для этого выделим в стержне элементарный участок длиной dz (рис. 1, б). Произвольно взятый отрезок $AB = dz$ от действия температуры получит удлинение Δl , которое будет складываться из удлинения от нагрева Δl_t и упругого удлинения Δl_y :

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_y. \quad (2)$$

Удлинение от температуры определяется известным из [6, 7] соотношением $\Delta l_t = \alpha_1 T(y) dz$, в котором α_1 — коэффициент линейного расширения материала стержня.

Разделив обе части уравнения (2) на dz , получим соотношение для полной деформации ϵ как сумму температурной и упругой ϵ_y деформаций

$\epsilon = \alpha_1 T(y) + \epsilon_y$. Полная деформация ϵ будет постоянной по высоте, так как температура по сечению стержня распределена симметрично. Из этого соотношения следует, что

$$\epsilon_y = \epsilon - \alpha_1 T(y).$$

Следовательно, согласно закону Гука, напряжение наплавки будет определяться соотношением

$$\sigma_H = \epsilon_y E_1 = E_1 (\epsilon - \alpha_1 T(y)), \quad (3)$$

где E_1 — модуль упругости материала стержня.

Исходя из того, что нормальная сила N в поперечном сечении стержня площадью $A = b h_2$ отсутствует, можно записать $N = \int \sigma_H dA = 0$. Учитывая (3), это уравнение можно представить в виде $E_1 \int (\epsilon - \alpha_1 T(y)) dA = 0$ или, после раскрытия скобок, — в виде

$$\epsilon A - \alpha_1 T_0 A - 2^n \alpha_1 h_2^{n-1} T_2^* \int |y|^n dA = 0. \quad (4)$$

Для стержня прямоугольного поперечного сечения $dA = b dy$. Поэтому

$$\begin{aligned} \int_A |y|^n dA &= 2b \int_0^{h_2/2} |y|^n dy = \\ &= \frac{2b |y|^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{h_2/2} = \frac{2b}{n+1} \cdot \frac{h_2^{n+1}}{2^{n+1}} = \frac{b}{n+1} \cdot \frac{h_2^{n+1}}{2^n}. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим

$$\epsilon A - \alpha_1 T_0 A - \frac{\alpha_1 b h_2 T_2^*}{n+1} = 0, \text{ или, сократив на величину } A = b h_2, \text{ найдем}$$

$$\epsilon = \alpha_1 \left(T_0 + \frac{T_2^*}{n+1} \right). \quad (6)$$

И теперь в соответствии с (3) можно определить напряжения наплавки:

$$\sigma_H = E_1 \alpha_1 \left(\frac{T_2^*}{n+1} - T_2^* \left(\frac{2|y|}{h_2} \right)^n \right). \quad (7)$$

Кроме напряжений наплавки σ_H в стержне будут также возникать остаточные напряжения, связанные с остыванием стержня и наплавленных слоев ниже температуры T_2 . При температуре T_2 между наплавленными слоями и материалом стержня появляется устойчивая адгезионная связь, и дальнейшее остывание влечет за собой появление напряжений, связанных с различными коэффициентами линейного расширения материалов стержня 1, наплавленных слоев 3 и переходных слоев 2, образовавшихся в результате диффузии наплавленного материала в материал стержня (рис. 2). Если коэффициент линейного расширения и модуль упругости в слоях 1 и 3 будут постоянными и равными соответственно α_1, E_1 и α_3, E_3 , то в слое 2 эти характеристики будут меняться вдоль оси Y. Ввиду малой толщины второго слоя эти характеристики можно считать изменяющимися линейно, т. е.

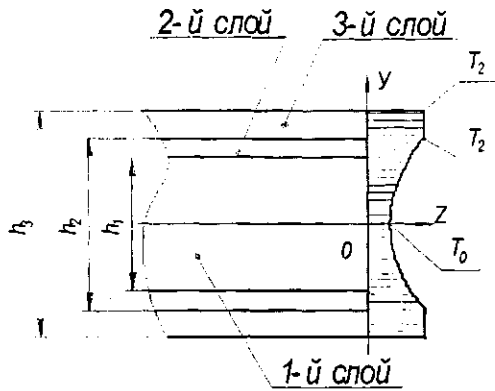


Рис. 2. Схема распределения температуры в стержне и наплавленном слое

$$\left. \begin{aligned} \alpha(y) &= \alpha_1 + (2|y| - h_1) \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{h_2 - h_1}, \\ E(y) &= E_1 + (2|y| - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Учитывая небольшую толщину наплавленного слоя 3, температуру в этом слое можно считать постоянной и равной T_2 (рис. 2).

При остывании длина элементарного участка dz стержня уменьшается (деформация от влияния температуры будет отрицательной). Ввиду симметричного расположения слоев и симметричного распределения температуры полная деформация ϵ в любом слое стержня будет одинаковой по высоте сечения. Она будет складываться из деформации от температуры (- ϵ_{it}) и упругой деформации слоя (ϵ_i), т. е. $\epsilon = \epsilon_i - \epsilon_{it}$, откуда можно определить упругую деформацию в i -том слое: $\epsilon_i = \epsilon + \epsilon_{it}$.

Следовательно, для первого слоя $\epsilon_1 = \epsilon + \alpha_1 T(y)$, для второго слоя $\epsilon_2 = \epsilon + \alpha(y) T(y)$, для третьего слоя $\epsilon_3 = \epsilon + \alpha_3 T_2$.

Тогда в соответствии с законом Гука, напряжения, возникающие при остывании в слоях стержня, будут равны:

$$\sigma_{1(0)} = \epsilon_1 E_1; \sigma_{2(0)} = \epsilon_2 E(y); \sigma_{3(0)} = \epsilon_3 E_3.$$

После подстановки значений $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ в полученные соотношения найдем:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1(0)} &= E_1(\epsilon + \alpha_1 T(y)), \\ \sigma_{2(0)} &= E(y)(\epsilon + \alpha(y) T(y)), \\ \sigma_{3(0)} &= E_3(\epsilon + \alpha_3 T_2). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Теперь рассмотрим уравнение равновесия $\sum Z = 0$ для элементарного участка стержня

$$\int_{A_1} \sigma_{1(0)} dA + \int_{A_2} \sigma_{2(0)} dA + \int_{A_3} \sigma_{3(0)} dA = 0, \quad (10)$$

где $A_1 = bh_1$, $A_2 = b(h_2 - h_1)$, $A_3 = b(h_3 - h_2)$ — площади поперечного сечения слоев 1, 2, 3.

Подставив (9) в (10), получим

$$\epsilon E_1 A_1 + E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA + \epsilon \int_{A_2} E(y) dA + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA + \epsilon E_3 A_3 + E_3 \alpha_3 T_2 A_3 = 0.$$

Из этого уравнения найдем

$$\epsilon = \frac{E_1 \alpha_1 \int_{A_1} T(y) dA + \int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA + E_3 \alpha_3 T_2 A_3}{E_1 A_1 + \int_{A_2} E(y) dA + E_3 A_3}. \quad (11)$$

Теперь, подставив (11) в соотношения (9), определим напряжения, возникающие в слоях наплавленного стержня при остывании. Интегралы, входящие в (11), легко вычисляются при конкретных значениях коэффициентов линейного расширения и температуры. Напряжения наплавки в слоях 1 и 2 будут определяться по формуле (7), а в слое 3 они будут равны нулю.

Таким образом, остаточные напряжения, возникающие при двухсторонней наплавке стержня с прямоугольным поперечным сечением, будут складываться из напряжений наплавки и напряжений остывания

$$\sigma_1 = \sigma_H + \sigma_{1(0)}; \sigma_2 = \sigma_H + \sigma_{2(0)}; \sigma_3 = \sigma_{3(0)}. \quad (12)$$

При вычислении интегралов, входящих в уравнение (11), следует иметь в виду, что функции $\alpha(y)$, $E(y)$ и $T(y)$ записаны через абсолютное значение $|y|$. Поэтому интегралы необходимо вычислять по верхней половине поперечного сечения стержня, удваивая результат. Следовательно,

$$\int_{A_1} T(y) dA = 2b \int_0^{h_1/2} \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2 \cdot y}{h_2} \right)^n \right) dy; \quad (13)$$

$$\int_{A_2} E(y) dA = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) dy; \quad (14)$$

$$\int_{A_2} E(y) \alpha(y) T(y) dA = 2b \int_{h_1/2}^{h_2/2} \left(E_1 + (2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(\alpha_1 + 2(2y - h_1) \frac{E_2 - E_1}{h_2 - h_1} \right) \cdot \left(T_0 + T_2^* \left(\frac{2y}{h_2} \right)^n \right) dy. \quad (15)$$

Разработанная физико-математическая модель расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа позволила с помощью пакета прикладных программ MATHCAD PLUS 6.0 и МАТЕМАТИКА 2.2, работающих в среде WINDOWS, произвести на ПЭВМ численные исследования остаточных напряжений в покрытиях, сформированных ЭМН различных порошков на установке с магнитной системой из магнитотвердого материала — ЮНДК24Т (ГОСТ 17809 - 72).

При определении остаточных напряжений для каждого образца задавались теплофизические и упругие характеристики материалов покрытия и основы, геометрические параметры системы, диапазон температур, который обеспечивался режимом ЭМН. Последний был оптимальным [2] за исключением силы разрядного тока, т.к. изменением его регулировали температуру в системе покрытие-основа. Приняли, что покрытия наплавлились на поверхность диаметром 40 мм из стали 45 (ГОСТ 1050 - 88), подвергнутой нормализации, порошками Fe-9%В, ФВХ 6-2, Fe-2%V, Fe-2%Ti, X18ФН2М. Установлено, что в зависимости от условий наплавки величина остаточных напряжений в покрытии изменяется в пределах от 182 до 543 МПа, в основе от - 8 до - 15 МПа. Характер их распределения не

изменяется: в покрытии формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса ЭМН за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие-основа. Так, изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5 ... 1,8 раза. Например, для покрытия Fe-2%V при температуре поверхности основы 159°C тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности покрытия равны 146 МПа, при 200°C – 263 МПа, т.е. напряжения увеличиваются. При тех же условиях тангенциальные сжимающие напряжения на поверхности основы соответственно равны – 11,5; – 14,8 МПа. Следовательно, с возрастанием температуры увеличение тангенциальных напряжений в основе аналогично увеличению их в покрытии. Такая закономерность характерна и для других исследуемых материалов порошка. Так, например, наименьшие остаточные напряжения в примененном температурном диапазоне имеют покрытия из порошка X18ФН2М, наибольшие – Fe-9%B. Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150°C, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 100 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

162(Fe-9%B)→154(ФБХ 6-2)→146(Fe-2%V)→128(Fe-2%Ti)→122(X18ФН2М).

По условию минимальных остаточных напряжений на границе раздела покрытие-основа наиболее благоприятным для эксплуатационных условий будет покрытие из порошка X18ФН2М, которое имеет наименьшие растягивающие остаточные напряжения в покрытии.

Результаты численных исследований остаточных напряжений в системе покрытие-основа показали, что величина остаточных напряжений в зависимости от химического состава порошка и режима нанесения покрытий может изменяться в широких пределах.

С целью проверки разработанного теоретического метода расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа проведены исследования по их экспериментальному определению, которые проводились рентгеноструктурным анализом, используя метод определения параметров линейно-напряженного состояния материала по смещению линий рентгенограммы [8, 9].

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3 в кобальтовом немонахроматизированном излучении. Съемка профиля рентгеновской линии выполнялась в автоматическом режиме. Анализ полученных результатов показал, что в покрытиях формируются остаточные напряжения растяжения, которые для исследуемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

139(Fe-9%B)→132(ФБХ 6-2)→122(Fe-2%V)→110(Fe-2%Ti)→101(X18ФН2М).

Видно, что остаточные напряжения, определенные в покрытиях, как расчетным путем, так и экспериментально, по значениям близки. При этом определенные экспериментально имеют меньшие значения. Расхождение значений напряжений находится в пределах 14 ... 18 %, что дает основание рекомендовать разработанную математическую модель для расчета остаточных напряжений в системе покрытие-основа при наплавке.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

Разработана физико-математическая модель определения остаточных напряжений в системе покрытие-основа при ЭМН порошков.

Численные исследования остаточных напряжений показали, что при ЭМН в покрытиях формируются растягивающие тангенциальные и сжимающие радиальные напряжения, в основе – сжимающие тангенциальные и радиальные. Увеличение теплонапряженности процесса наплавки за счет повышения разрядного тока приводит к росту термопластических деформаций в системе покрытие-основа. При этом изменение разрядного тока от 100 до 150 А увеличивает остаточные напряжения в 1,5 ... 1,8 раза.

Численные исследования остаточных напряжений показали, что при температуре основы 150°C, которую обеспечивает оптимальная сила разрядного тока, равная 100 А, в покрытиях формируются растягивающие остаточные напряжения, которые для покрытий из рассматриваемых порошков в порядке убывания их величины можно расположить в следующей последовательности:

162(Fe-9%B)→154(ФБХ 6-2)→146(Fe-2%V)→128(Fe-2%Ti)→122(X18ФН2М).

Анализ результатов, полученных экспериментальным путем, показал, что в покрытиях формируются остаточные напряжения растяжения, которые для исследуемых порошков в порядке убывания их величины можно рассматривать в следующей последовательности:

139(Fe-9%B)→132(ФБХ 6-2)→122(Fe-2%V)→110(Fe-2%Ti)→101(X18ФН2М).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кряжков В. М. Надежность и качество сельскохозяйственной техники. – М.: Агропромиздат, 1989. – 335 с.
2. Кожуро Л. М., Чемисов Б. П. Обработка деталей машин в магнитном поле. – Мн.: Наука і техника, 1995. – 232 с.
3. Теория и практика нанесения защитных покрытий./ Витязь П. А., Ивашко В. С., Ильюшенко А. Ф. и др. – Мн.: Беларуская наука, 1998. – 583 с.
4. Остаточные напряжения./ Мрочек Ж. А. Макаревич С. С., Кожуро Л. М. и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 352 с.

5. Барвинок В. А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. - М.: Машиностроение, 1990. - 384 с.

6. Яшеричин П. И. Остаточные напряжения при электромагнитной наплавке / С. С. Макаревич, А. П. Ракомсин, Л. М. Кожуро // Весці НАН Беларусі: Сер. физ.-техн.наук. - 2000. - №2. - С.62-65.

7. Биргер И. А. Остаточные напряжения / И. А.

Биргер. - М.: Машгиз, 1963. - 240 с.

8. Миркин Л. И. Рентгеноструктурный анализ машиностроительных материалов: Справочник. - М.: Машиностроение, 1979. - 134 с.

9. Комяк Н. И., Мясников Ю. Т. Рентгеновские методы и аппаратура для определения напряжений. - Л.: Машиностроение, 1972. - 88 с.

УДК 631.51

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 17.06. 2006

КАК ПРАВИЛЬНО ОБРАБАТЫВАТЬ ПОЧВУ

В.П. Валько, канд. с-х. наук (УО БГАТУ); А. В. Щур, канд. с-х. наук (Могилевский филиал РНИУП «Институт радиологии»); О. В. Валько, ассистент (БГУ)

АННОТАЦИЯ

Освещены результаты теоретических и экспериментальных исследований по вопросам обработки почвы. Выдвигаются новые подходы к почве как объекту сельскохозяйственного использования. Анализируется влияние обработки на количественный и качественный состав микрофлоры почвы, ее биологическую активность, которые и определяют интенсивность круговорота веществ в природе, воспроизводительную функцию почвы. Даются конкретные рекомендации специалистам и руководителям хозяйств, как обрабатывать почву, чтобы получать необходимые урожаи с наименьшими издержками для производителя и плодородия почвы.

Введение

Исторически сложилось так, что с начала XVIII века с появлением стального плуга вся земля, находящаяся в сельскохозяйственном использовании, стала подвергаться глубокой обработке с оборотом пласта. Такой прием вызывает усиленную дегумификацию почвы, разрушение структуры, вследствие чего почва теряет способность удерживать влагу, питательные вещества, и плодородие почвы падает. Как следствие этого, затраты на поддержание нужного для человека уровня производства сельскохозяйственной продукции с каждым годом возрастают, а отдача от вложенного капитала уменьшается. Например, если в 50-е годы внесение тонны удобрений в среднем повышало урожай зерновых на 11,5 т, то в 60-е годы прибавка составила только 8,3 т, а в 70-е снизилась до 5,8 т. [4]. При этом повышается опасность эрозийных процессов. По оценкам специалистов, во всем мире из-за водной и ветровой эрозии безвозвратно потеряно более 6 млн. га сельскохозяйственных угодий. Все эти негативные явления привели к необходимости разработки и внедрения технологий сберегающего земледелия. Целью выбора обработки почвы должна быть не максимальная урожайность любой ценой, а минимальные затраты на единицу произведенной продукции с максимальным сохранением воспроизводства плодородия почвы.

Основная часть

Обработка почвы - один из основных элементов любой системы земледелия. Основные её задачи - создание оптимальной структуры почвы, благоприятного водного, воздушного и пищевого режимов для почвенной биоты, роста и развития растений. Известно, что в рас-

тенииоводстве самым энергозатратным технологическим приёмом является обработка почвы, которая требует значительных расходов нефтепродуктов, и эти затраты достигают до 35% общих затрат на производство того или иного вида продукции. Высокий уровень цен на топливо и оплату труда снижают рентабельность сельскохозяйственного производства. В то же время выход республики на мировой рынок и предстоящее вступление в ВТО остро ставит вопрос повышения конкурентоспособности отечественной сельскохозяйственной продукции. В этих условиях необходим переход на качественно новые, более экономичные агротехнологии, которые позволят нашей республике занять достойное место в одном ряду с ведущими мировыми сельхозпроизводителями.

Применяемая в республике многооперационная технология обработки почвы, основанная на отвальной вспашке и многократных культивациях, помимо того, что требует больших энергетических и трудовых затрат, приводит к развитию эрозийных процессов и снижению плодородия почвы в целом. Несовершенная конструкция плугов, низкая их производительность не позволяют своевременно произвести зяблевую пахоту на всей площади, из-за этого снижается урожайность и создаются условия для развития сорняков и эрозии почвы.

В связи с этим, одним из путей энергосбережения является совершенствование процессов обработки почвы как за счёт применения комбинированных высокопроизводительных машин и орудий, так и за счёт её минимизации, которые обеспечивают подготовку почвы к посеву за один проход. К таким агрегатам