

Басалай Г. А.

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФРЕЗЕРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНОЙ ПОРОДЫ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ**

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*Выполнен анализ конструкций исполнительных органов двух основных типов проходческих и проходческо-очистных комбайнов, а также представлены результаты натурных экспериментов на проходческом комбайне с соосными роторами при его работе в условиях рудника разрабатываемого месторождения калийных солей, проведенных с целью определения нагрузок на зубках от сил сопротивления резанию породы, а также удельных затрат энергии на работу фрезерующих механизмов. Предложены основные направления повышения эффективности работы исполнительных органов проходческих комбайнов за счет модернизации фрезерующе-погрузочных механизмов, а также оптимизации процессов взаимодействия породоразрушающих элементов (зубков) с массивом горной породы.*

**Введение.** Основным технологическим процессом при промышленной разработке Старобинского месторождения калийных солей подземным способом в Республике Беларусь за более чем полувековой период является механизированная отработка плодородных горизонтов проходческими и очистными комплексами машин с транспортированием горной породы по горным выработкам участковыми скребковыми и магистральными ленточными конвейерами к пунктам перегрузки в скипы шахтных подъемных машин. В этой связи, эффективность работы технологического комплекса машин и оборудования в рудниках определяется удельными энергозатратами, во-первых, на фрезерование массива горной породы исполнительными органами проходческих, проходческо-очистных и очистных комбайнов, во-вторых, на работу системы рудничного конвейерного транспорта. В настоящее время максимальные суммарные годовые объемы выдаваемой на земную поверхность горной породы из пяти рудников для ее дальнейшего обогащения на четырех солеобогатительных фабриках ОАО «Беларуськалий» составляют около 40 млн. тонн, из которой производят до 8,0 млн. т. высококачественных калийных удобрений. Следует отметить, что в энергетическом балансе добычи и обогащения полезного ископаемого до 80 % занимают затраты, сопровождаемые одновременным фрезерованием, транспортированием, подъемом на поверхность, отделением при обогащении и складированием пустой горной породы. Поэтому, все более остро ставятся задачи на ближайшую перспективу, в том числе, и в направлении повышения эффективности работы исполнительных органов проходческих комбайнов за счет модернизации фрезерующе-погрузочных механизмов, а также оптимизации процессов взаимодействия породоразрушающих элементов (зубков) с массивом горной породы.

**Анализ исполнительных органов основных типов проходческих комбайнов.** На рудниках ОАО «Беларуськалий» в основном технологическом процессе широко используются два типа проходческих комбайнов в подавляющем большинстве от отечественного производителя – ЗАО «СИПР с ОП» [1–4]. Они оснащены различными по конструктивному исполнению и принципу взаимодействия с массивом горной породы фрезерующими меха-

низмами. Комбайны выполняют в основном проходку транспортных, конвейерных и вентиляционных штреков арочной формы, а также сбоек между ними, при формировании шахтных полей для отработки плодородных пластов очистными комплексами.

Первый тип составляют современные проходческие комбайны КРП-3, в которых при однотипном комбинированном исполнительном органе с предыдущим поколением комбайнов типа ПКС-8 в виде соосно расположенных центрального трехлучевого ротора и наружного ротора (крестовины с ковшами), принципиальное изменение претерпел спаренный электромеханический привод соосных роторов, в котором используются отдельные трехступенчатые редукторы с двухступенчатыми планетарными передачами (рис. 1, а, б).

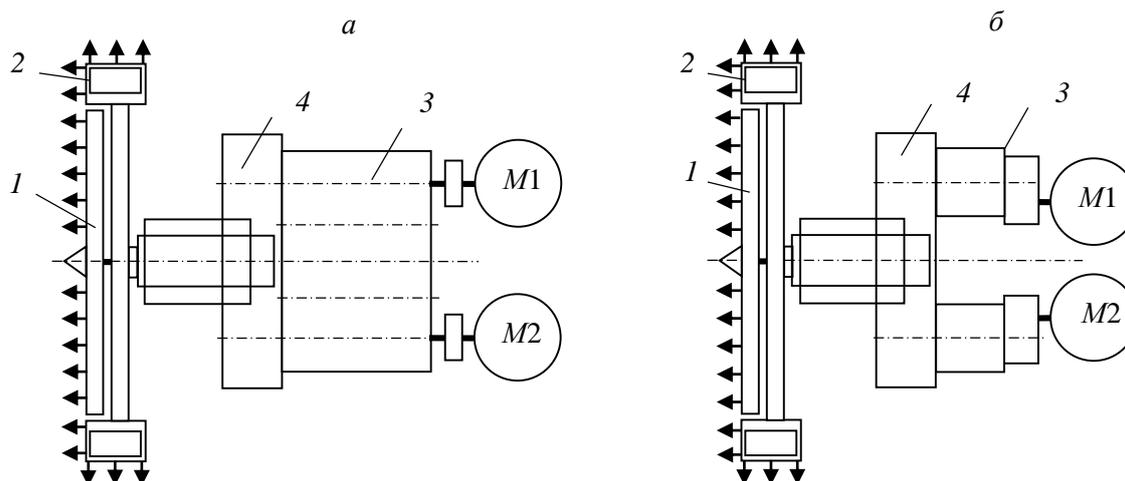


Рис. 1. Схемы двухмоторных приводов соосных роторов проходческих комбайнов:  
 а – ПКС-8; б – КРП-3 [5]; 1 и 2 – центральный и внешний роторы;  
 3 и 4 – редукторы привода

Основной исполнительный орган комбайна, т. е. центральный ротор и крестовина с ковшами оснащены по фронту основными породоразрушающими элементами, т. е. тангенциальными резцами (зубками) типа Д6.22, а по периферии ковшей – радиальными резцами типа ШБМ. Зубки Д6.22 конструктивно выполнены с твердосплавными вставками в виде цилиндрических стержней диаметром 14 мм, имеющих фронтальную клиновидную рабочую часть. По способу взаимодействия зубков Д6.22 с массивом породы исходя из конструкции их рабочих кромок и круговой траектории их движения как на центральном роторе так и на крестовине с ковшами можно констатировать, что в этом режиме происходит закрытое резание. В результате такого взаимодействия каждого зубка с массивом по фронту забоя формируется ширина полосы, равная трем слагаемым: ширина рабочей части зубка и две боковые треугольные зоны интенсивных сколов породы шириной до 1,3 относительно глубины резания (толщины стружки).

Ко второму типу относятся проходческо-очистные комбайны КПО-10,5 (КПО-8,5) со спаренными двухдисковыми планетарными механизмами фрезерования, выполненными по схеме перпендикулярно расположенных осей дисков в относительном и переносном их вращении (рис. 2). При этом оси переносного вращения дисков левого и правого механизмов параллельны. Диски комбайна работают на полный захват, т. е. ширина фрезерования равна внешнему диаметру диска по концам режущих кромок зубков. Это значит, что в секторах плавного входа и выхода зубков в зонах контакта с массивом породы образуется мелкая фракция. Следует также отметить, что фрезерование массива по

площади забоя ведется этими комбайнами с значительным перекрытием в его центральной части дисками левого и правого планетарных механизмов, что приводит к нежелательному увеличению содержания мелкой фракции в общей массе отбитой породы, и как следствие, увеличению удельных затрат энергии.

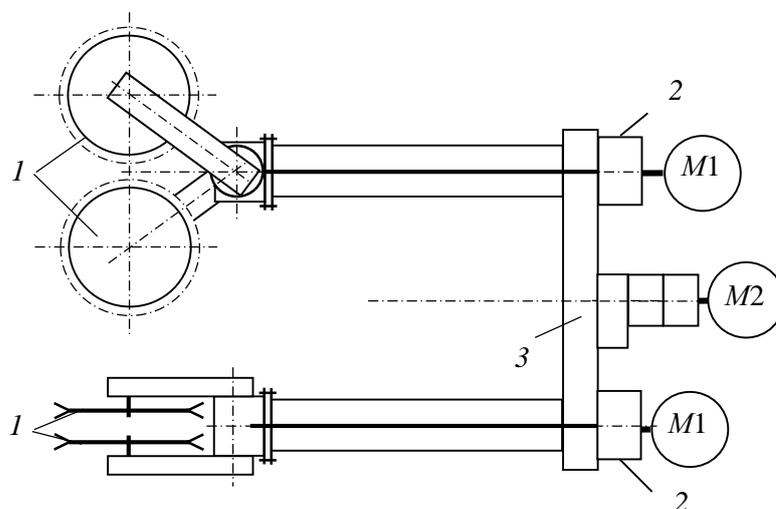


Рис. 2. Схема привода сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа проходческо-очистного комбайна:

1 – режущие диски левого и правого планетарных механизмов; 2 – приводы относительного вращения дисков; 3 – общий привод переносного вращения дисков

Диски планетарных механизмов оснащены тангенциальными резцами РКС-1, имеющими конусную рабочую кромку. Благодаря двойному вращательному движению зубков вместе с дисками в этом режиме происходит полуоткрытое резание, что обеспечивает снижение удельных затрат энергии на разрушение породы по сравнению с закрытым, как отмечалось выше при анализе исполнительного органа комбайна с соосными роторами.

В рассмотренных типах комбайнов бермовые фрезы выполняют двойную функцию – фрезерование массива породы по формируемой плоской форме штрека с одновременным перемещением шнеками сфрезерованной горной массы по почве выработки в поперечном направлении для эффективного зачерпывания ее ковшами наружного ротора или подачи ее в приемный люк скребкового конвейера.

Общим для двух типов комбайнов является то, что они работают в режиме расчетной подачи машины на забой с помощью гусеничного движителя, а также одновременной отработкой массива по всему контуру поперечного сечения.

Цель исследований – проведение серии натурных экспериментов на серийном проходческом комбайне в реальных горно-технологических условиях рудников и на их основе определение нагрузок на зубках, а также удельных затрат энергии на работу соосных роторов.

В результате проведения экспериментов на проходческом комбайне КРП-3-66/1140 при проходке подготовительных горных выработок на руднике 5РУ ОАО «Беларуськалий» получены значения токов и напряжений питания основных электродвигателей привода соосных роторов при фрезеровании зубками разрабатываемого массива горной породы в четырех режимах работы комбайна, характеризующихся различной скоростью подачи его на забой [6].

Исходя из принципиальной схемы расстановки зубков на роторах принято, что на формирование суммарного момента сопротивления фрезерованию породы оказывают влияние моменты сопротивления фрезерованию от каждого зубка, расположенного на

определенной линии резания разнo удаленной от оси вращения роторов. Принимая во внимание то, что толщина стружки и ширина линии резания для всех зубков одинаковы, в первом приближении принято допущение, что и силы сопротивления резанию на всех зубках также одинаковы. Однако для более глубокого анализа следует учитывать, что кривизна траекторий, а также линейная скорость резания конкретного зубка существенно зависит от радиуса окружности, по которой проходит линия его резания. В свою очередь, и затраты энергии в единицу времени на каждом зубке следует определять с учетом их линейных скоростей резания.

Обработка данных, полученных при непосредственном измерении электрических параметров при работе комбайна в забое, выполнялась с использованием программы PowerGraph. Результаты расчета средней силы сопротивления резанию на каждом зубке при четырех скоростях подачи комбайна на забой представлены на рис. 3.

С учетом того, что на центральном роторе фрезерование горной породы обеспечивается в каждой из 15 линий резания одним зубком, то можно констатировать, что толщина снимаемого ими слоя (толщина стружки) в зависимости от указанных на графике четырех скоростей подачи комбайна на забой при частоте вращения ротора около 13,2 об/мин составила примерно 8, 10, 13 и 17 мм. На крестовине с ковшами при частоте вращения около 7 об/мин расположены по два зубка в линиях резания, поэтому с незначительным допущением можно считать, что толщина стружки также соответствует вышеуказанным значениям для зубков центрального ротора.

На рис. 4 представлена зависимость удельных затрат мощности на единицу объемной производительности от скорости подачи комбайна на забой. Из графика видно, что, как и следует из теории резания (фрезерования) горных пород, с увеличением толщины снимаемого слоя породы зубками силы сопротивления резанию на зубках возрастает, однако удельные затраты мощности на единицу объемной производительности существенно снижаются по экспоненциальному закону. Этот вывод следует учитывать при выборе рабочей скорости подачи комбайна на забой.

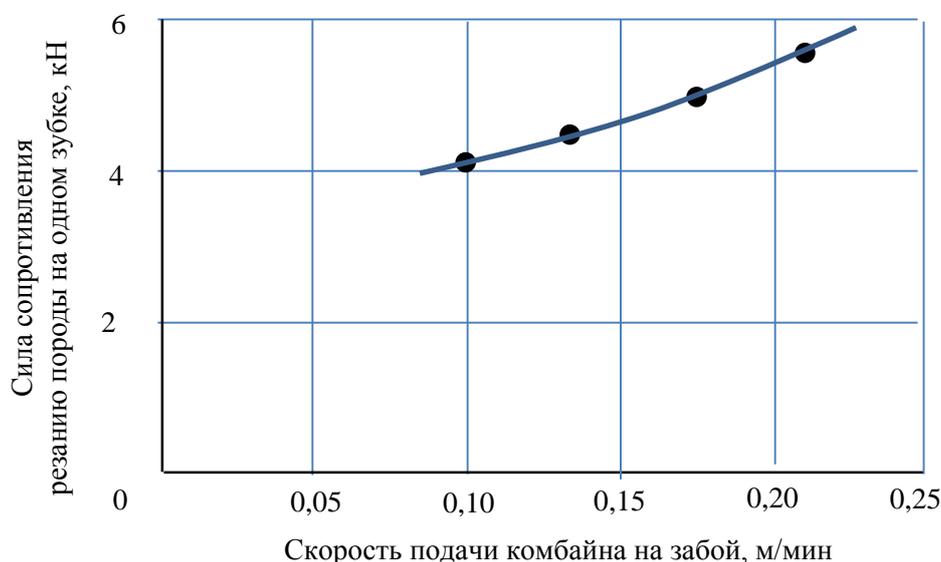


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления резанию породы на одном зубке от скорости подачи комбайна на забой

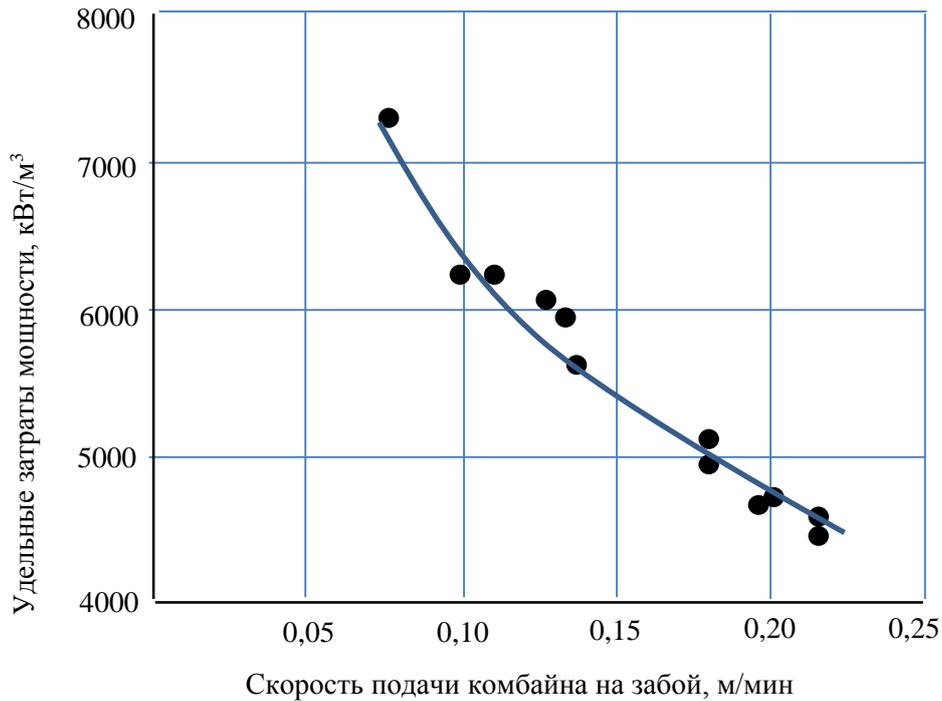


Рис. 4. Зависимость удельных затрат мощности на единицу объемной производительности от скорости подачи комбайна на забой

**Основные варианты модернизации исполнительных органов.**

1. Оптимизацию конструкции привода соосных роторов проходческого комбайна типа КРП-3 предлагается провести путем его модернизации по схеме одномоторного привода вместо двухмоторного, как показано на рис. 5. Для этого рекомендуется использовать электродвигатель мощностью 240 кВт вместо двух – по 132 кВт. Первая ступень 1 привода может быть выполнена в виде двухступенчатого цилиндрического редуктора с соосными ведущим и ведомым валами [7], или в виде двухступенчатой планетарной передачи. В результате, за счет упрощения кинематической схемы и исключения циркуляции мощности во внутренних контурах повысится КПД привода.

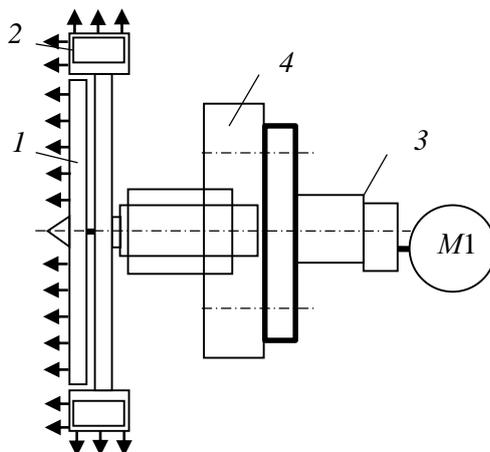


Рис. 5. Схема одномоторного привода соосных роторов:  
 1 – центральная ступень привода; 2 – крестовина с ковшами; 3 – первая ступень привода;  
 4 – распределительный редуктор второй ступени привода

2. С целью снижения удельных затрат энергии на фрезерование горной породы и увеличения производительности проходческо-очистного комбайна в его сдвоенном исполнительном органе, включающем левый и правый планетарные механизмы фрезерования, каждый из которых содержит основной редуктор и раздаточный редуктор, на корпусах раздаточных редукторов закреплены с возможностью поворота друг относительно друга две рукояти с режущими дисками, каждая рукоять снабжена дополнительными резцами, установленными в резцедержателях, закрепленных на рукояти, с возможностью осуществления опережающего снятия слоя породы по контуру внешних траекторий резцов режущих дисков, при этом режущие кромки дополнительных резцов расположены в плоскости, перпендикулярной осям переносного вращения рукоятей с режущими дисками [8].

3. Одним из рациональных вариантов модернизации сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа является также непараллельное расположение осей переносного вращения дисков левого и правого механизмов [9], что существенно уменьшает площадь центральной зоны забоя, в которой происходит фрезерование массива породы одновременно зубками дисков левого и правого механизмов.

#### **Выводы.**

1. В результате выполненных натурных экспериментов в реальных горно-технологических условиях рудника на проходческом комбайне при различной скорости подачи его на забой получены средние значения сил сопротивления резанию породы на одном зубке, а также удельные затраты мощности на работу роторов. С увеличением толщины снимаемого слоя породы зубками сила сопротивления резанию возрастает, однако удельные затраты мощности на единицу объемной производительности существенно снижаются.

2. Для повышения эффективности исполнительных органов проходческого и проходческо-очистного комбайнов предложены три варианта модернизации исполнительных органов. В первом случае достигается существенное снижение металлоемкости конструкции привода соосных роторов и увеличение его КПД за счет упрощения кинематической схемы.

Во втором варианте модернизации достигается более рациональный режим фрезерования горной породы дисками планетарных механизмов по периферийным зонам выработки за счет дополнительных зубков, установленных на рукоятях.

В третьем варианте с непараллельными осями переносного вращения дисков сдвоенного планетарного механизма обеспечивается существенное уменьшение центральной зоны забоя, в которой работают зубки левого и правого механизмов.

Таким образом, модернизация сдвоенного планетарно-дискового исполнительного органа по второму и третьему вариантам обеспечивает существенное уменьшение образования мелкой и пылевидной фракций и, одновременно, снижение удельных затрат мощности на единицу объемной производительности комбайна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смычник, А. Д. Технология и механизация разработки калийных месторождений : учеб. пособие / А. Д. Смычник, Б. А. Богатов, С. Ф. Шемет. – 2-е изд., доп. и перераб. – Мн. : Юнипак, 2005. – 224 с.

2. Горные машины : учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2. Машины и комплексы для добычи полезных ископаемых / Г. В. Казаченко, В. Я. Прушак, Г. А. Басалай. – Минск : Вышэйшая школа, 2018. – 228 с.

3. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В. А. Данилов [и др.] ; под ред. В. Я. Прушака. – Мн. : Тэхналогія, 2010. – 175 с.

4. Горные машины. Практикум : учебное пособие. / Г. В. Казаченко, Г. А. Басалай, Г. И. Лютко. – Минск : Вышэйшая школа, 2020. – 200 с.

5. Привод соосных исполнительных органов проходческого комбайна. (ВУ) Полезная модель № 9587 (Е 21С 31/00) от 04.014.2013. Оpubл. БИ 30.10.2013. / В. Я. Прушак [и др.].

6. Басалай, Г. А. Удельные затраты энергии на работу соосных роторов проходческого комбайна / Г. А. Басалай. // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XXI МНТК «Чтения памяти Р. В. Кубачека», проведенной в рамках Уральской промышленной декады 6–7 апреля 2023 г. / под общ. ред. Ю. А. Лагуновой. – Екатеринбург УГГУ, 2023. – С. 21–25.

7. Привод исполнительного органа проходческого комбайна. (ВУ) Патент № 14177 (Е 21С 31/00) от 30.01.2009. Оpubл. БИ 30.08.2010 / Г. А. Басалай [и др.].

8. Планетарный исполнительный орган проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 9284 (Е 21С 31/04) от 21.12.2012. Оpubл. БИ 30.06.2013 / Г. А. Басалай [и др.].

9. Привод спаренного планетарного исполнительного органа проходческо-очистного комбайна. (ВУ) Полезная мод. № 10189 (Е 21С 31/04) от 16.12.2013. Оpubл. БИ 30.06.2014 / Г. А. Басалай [и др.].

*Поступила 2.11.2023*

УДК 621.791

**Веремейчик А. И.<sup>1</sup>, Овчинников Е. В.<sup>2</sup>, Онысько С. Р.<sup>1</sup>, Сазонов М. И.<sup>1</sup>,**

**Хвисевич В. М.<sup>1</sup>, Хеук М. В.<sup>1</sup>**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО  
ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ 45**

*1. Учреждение образования «Брестский государственный технический университет»,*

*Брест, Беларусь*

*2. Учреждение образования «Гродненский государственный университет*

*им. Я. Купалы», Гродно, Беларусь*

*На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса поверхностного плазменного упрочнения изделий из стали 45, определены оптимальные энергетические параметры генератора плазмы плазменной установки, кинематические параметры источника плазмы, теплофизические характеристики поверхностного слоя металла, что позволяет усовершенствовать процесс упрочнения и создавать поверхностный слой металлоизделий с управляемыми механическими свойствами.*

**Введение.** Повышение срока службы деталей машин и механизмов остается актуальным вопросом и в настоящее время. Для решения этой проблемы в машиностроительной отрасли применяются различные упрочняющие технологии, в которых используются термические методы упрочнения: объемная закалка, электронно-лучевые, катодно-дуговые, лазерные и плазменные методы.

Как показала практика, технология плазменного поверхностного упрочнения является наиболее доступной, рациональной, экономически и экологически эффективной по сравнению с другими технологиями упрочнения изделий концентрированными источниками нагрева где используется сложное и дорогостоящее оборудование, предъявляются высокие требования к его техническому состоянию [1]. Способы плазменного упрочнения, имея упомянутые достоинства, постоянно совершенствуются, что обусловлено необходимостью разработки новых методик для получения оптимальных характеристик