

металлургії: наук. праці. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2007.

4. Ясев, А. Г. Соответствие математических моделей и технологических процессов в металлургии и машиностроении / А. Г. Ясев. – Днепропетровск: Днепр-VAL, 2001. – 237 с.

5. Имитационное моделирование процесса обработки потоком абразивных частиц / А. Е. Проволоцкий [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1987. – № 4. – С. 112–117.

6. Гидроабразивная установка для обработки внутренних поверхностей деталей типа труб / а. с. 1280814 СССР, МКИ В 24 С 3/16 / В. Н. Морозенко, И. П. Онуфриенко, А. Е. Проволоцкий, В. П. Капустенко, В. А. Захарченко, А. А. Ворохов, В. С. Гришин, Г. М. Быков, А. Г. Ясев (СССР). – № 3905104/08; заявл. 16.04.85.

7. Гидроабразивная установка для обработки внутренних поверхностей деталей типа труб: а. с. 1797222 СССР, МКИ В 24 С 3/16 / В. Н. Морозенко, А. Е. Проволоцкий, В. С. Гришин, А. Г. Ясев, И. П. Онуфриенко, В. П. Капустенко, А. А. Ворохов, В. А. Захарченко

(СССР). – № 4098383/08; заявл. 25.07.86.

8. Ясев, А. Г. Применение методов оптимизации технологических процессов / А. Г. Ясев // Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Т. 8: Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – Одесса: ОНПУ, 2004. – С. 163–217.

9. Проволоцкий, А. Е. Комбинированная оптимизация технологических параметров струйно-абразивной обработки деталей машин / А. Е. Проволоцкий, А. Г. Ясев // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 3. – С. 69–72.

10. Ясев, А. Г. Прогнозирование надежности и оптимизация параметров элементов гидропривода металлургических машин / А. Г. Ясев // Системные технологии. – 2002. – № 6 (23). – С. 140–147.

11. Гидроабразивная установка для обработки осевых отверстий плунжеров / В. А. Захарченко [и др.] // Технология авиационного приборо- и агрегатостроения. – 1990. – № 4. – С. 7–9.

Поступила 02.02.2009

УДК 621.792

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ

*Докт. техн. наук БЕЛЯВИН К. Е., СОСНОВСКИЙ А. В.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

Для обработки почвы широко используются пружинные зубья роторных почвообрабатывающих машин, которые выпускаются серийно и представляют собой стержень с витой пружиной на конце, изготавливаемый из сталей 60С2А, 50ХГА, 55С2ГФ. Данное изделие является быстроизнашиваемым, ресурс, как правило, меньше наработки одного полевого сезона (7 га). Износ поверхности составляет 10 %, причем срок службы, ограниченный усталостной прочностью зуба, в десятки раз превосходит ресурс работы, допустимый его линейным износом, поэтому в отходы идет большая часть зуба. В связи с этим актуальной является проблема упрочнения и восстановления пружинных зубьев роторных почвообрабатывающих машин [1]. Существующие методы восстановления и упрочнения (намораживание, электродуговая наплавка и др.) не удовлетворяют

требованиям, предъявляемым к эксплуатационным и физико-механическим свойствам зубьев почвообрабатывающих машин по ряду параметров (прочность сцепления покрытия с основой, износостойкость, твердость, ударная вязкость и др.).

Одним из перспективных методов повышения срока службы деталей является метод электроконтактного оплавления, заключающийся в оплавлении порошкового материала на поверхности разогретой детали. При этом деталь разогревается путем прямого пропуска через нее электрического тока [2].

Для реализации данного способа была разработана технология наплавки покрытий на поверхность деталей с использованием машин контактной сварки. Данный технологический процесс осуществляется следующим образом (рис. 1): между верхним 1 и нижним 2 электро-

дами электроконтактной установки крепится упрочняемая деталь 3, при этом деталь помещена внутри емкости 4 с порошковой шихтой 5, находящейся напротив наплавляемой поверхности. С трансформатора электроконтактной установки 6 подается напряжение на электроды, в результате чего происходит разогрев детали до температуры, выше температуры плавления порошка, но ниже температуры плавления материала детали. Частицы порошка, находящиеся вблизи поверхности детали, погруженной в емкость, оплавляются, образуя на ней покрытие заданной толщины. В качестве присадочного материала используются порошки на железной и никелевой основе, а также их смеси. Выбор этих материалов основан на том, что они имеют низкую температуру плавления (1040–1140 °С), а также позволяют получить покрытия, обладающие высокой твердостью (62–69 HRC).

Чтобы определить триботехнические свойства покрытий, полученных с помощью данной технологии, проводилось испытание на ударно-абразивное изнашивание. Дополнительно проводили металлографические исследования полученных покрытий для определения структуры наиболее приемлемой в условиях ударно-абразивного изнашивания.

**Методика проведения испытаний на ударно-абразивное изнашивание.** Исследование на ударно-абразивное изнашивание покрытий проводили на экспериментальной установке для испытания защитных покрытий на ударно-абразивное изнашивание. Данная установка позволяет производить испытания, сочетающие в себе абразивное изнашивание с ударной нагрузкой.

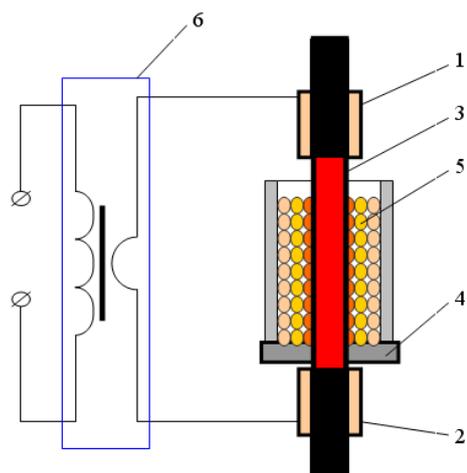


Рис. 1. Схема нанесения износостойких покрытий

В качестве абразивного материала применялась искусственная почвенная масса, состоящая из песка, глины (12–14 %) и гравия (6–8 %) при влажности 3–5 % и плотности 1,5–2,0 МПа, что примерно соответствует реальным условиям. Для проведения исследований диаметр контрообразца, выполненного из чугуна марки СЧ 35, выбирали от 100 до 97 мм, скорость скольжения – 7,55 м/мин. Энергия единичных ударов контрообразца составляла от 1 до 3 Дж. Для испытания использовали образцы, изготовленные из стали 45, с покрытием из порошков марки ПР-Х4Г2Р4С2Ф, ПГ-СР4 и шихты состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф и 30 % ПГ-СР4 толщиной 3 мм наплавленных методом электроконтактного оплавления.

**Результаты и анализ испытаний.** При наличии ударных нагрузок относительная износостойкость наплавленных покрытий значительно отличается от износостойкости полученной при испытаниях в условиях абразивного изнашивания без ударных нагрузок (рис. 2). Так, если относительная износостойкость покрытия из сплава ПР-Х4Г2Р4С2Ф без ударных нагрузок была самая высокая, то при появлении ударной нагрузки износостойкость покрытия значительно снижается (в 2–5 раз). Это можно объяснить высокой твердостью (65–67 HRC) покрытия, однако обладающего высокой хрупкостью, приводящей к интенсивному выкрашиванию при наличии ударов. Несмотря на меньшую твердость сплава ПГ-СР4 (61–63 HRC) и в два раза меньшую износостойкостью при

испытаниях без ударной нагрузки, величина износа покрытия при появлении ударной нагрузки увеличивалась в 2–3 раза. Это связано с тем, что покрытие обладает повышенной вязкостью благодаря никелевой основе, уменьшающей интенсивное выкрашивание. Большую износостойкость в условиях ударно-абразивных испытаний показало покрытие из шихты 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4, которое обладает оптимальным соотношением твердости и ударной вязкости, что позволяет противостоять значительным нагрузкам при ударно-абразивном изнашивании.

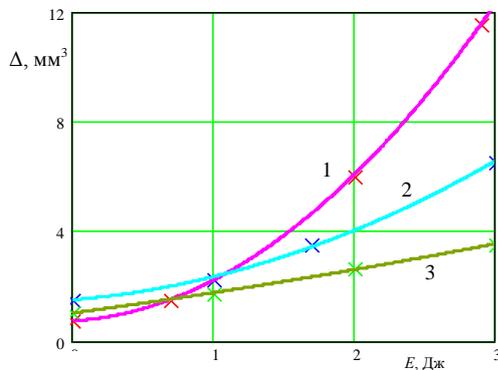
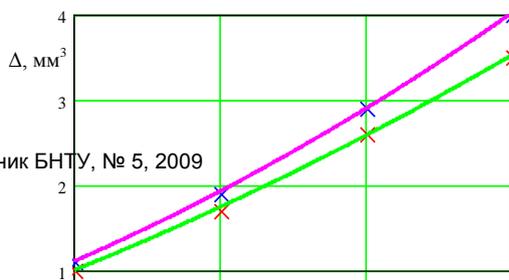


Рис. 2. Зависимость величины износа  $\Delta$  наплавленного покрытия от энергии удара  $E$ : 1 – ПР-Х4Г2Р4С2Ф; 2 – ПГ-СР4; 3 – 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4

Дополнительно проводили сравнительные испытания на ударно-абразивное изнашивание образцов с покрытиями, полученными методом намораживания из расплава [3] и методом электроконтактного оплавления (рис. 3). Испытания показали, что покрытие, полученное методом электроконтактного оплавления, обладает износостойкостью на 10–15 % выше, чем покрытие, полученное методом намораживания из расплава.

**Проведение металлографических исследований.** Основными задачами исследования были: оценка равномерности распределения элементов покрытия по объему; наличие пор; фазовый состав покрытия. Исследование микроструктуры проводили на металлографическом микроскопе POLIVAR-MET при увеличении от 200 до 1000 крат, рентгенофазовый анализ – на аппарате ДРОН-3.



1 2  
1 2 E, Дж 3  
Рис. 3. Зависимость величины износа  $\Delta$  наплавленного покрытия состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4 от энергии удара  $E$ : 1 – наплавлено методом намораживания из расплава; 2 – то же методом электроконтактного оплавления

В качестве объекта исследования использовали образцы с покрытием, полученным методом электроконтактного оплавления, а в качестве присадочного материала – порошки на основе железа (ПР-Х4Г2Р4С2Ф), никеля (ПГ-СР4), а также шихты из приведенных выше порошков в пропорции 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4.

Металлографические исследования покрытий из состава ПР-Х4Г2Р4С2Ф, полученных методом электроконтактного оплавления, проводились на образцах, наплавленных при температуре 1150 °С (рис. 4).

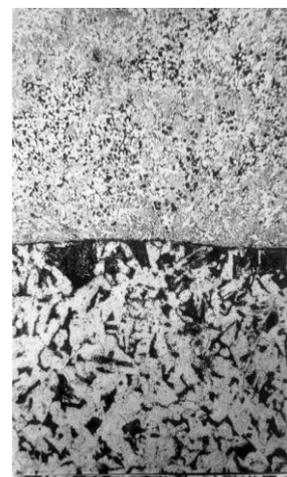


Рис. 4. Структура покрытия, полученного из состава ПР-Х4Г2Р4С2Ф,  $\times 200$

При наплавке образуется плотное покрытие, имеется четкая граница сплавления покрытия с основным металлом.

Рентгенофазовый и металлографический анализ покрытий показывает наличие следующих фаз: твердого раствора на основе  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe со смешанными карбидными ( $\text{CrFe}_x\text{C}_y$ ) и боридными ( $\text{CrFe}_3\text{B}$ ),  $\text{Cr}_2\text{B}$  выделениями раз-

личных форм и размеров. Также присутствуют карбобориды  $\text{CrFe}_x(\text{BC})_y$  и эвтектика типа  $\text{CrFe}_3(\text{Si}, \text{B})$ . Имеются оксиды сложного состава разных форм и размеров. Микротвердость матрицы данного покрытия соответствует 6130–6570 МПа; боридов – 9820–14210; эвтектики – 8580–9460 МПа.

Данное покрытие хорошо работает в условиях абразивного износа и трения. Однако в процессе ударно-абразивного износа происходит интенсивное выкрашивание покрытия, что связано с наличием твердых выделений. Металлографические исследования покрытий из ПГ-СР4 проводились на образцах, наплавлявшихся при температурах  $T = 1050$  и  $1100$  °С. Наплавка при  $T = 1050$  °С не позволяет получить достаточно качественное покрытие в связи с неполным расплавлением порошка (рис. 5). По всей поверхности покрытия и на границе раздела «покрытие – основной металл» имеются поры.

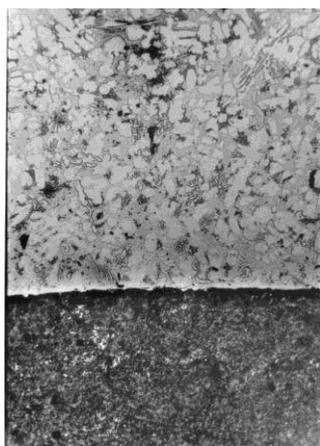


Рис. 5. Структура покрытия, полученного из состава ПГ-СР4

Проведенный рентгенофазовый и металлографический анализ показал наличие твердого раствора  $\text{Cr}$  и  $\text{Fe}$  в  $\text{Ni}$ . Как и в предыдущем материале, имеются включения карбидов и боридов аналогичного состава, а также наблюдается выделение эвтектики. Структура покрытия, выявленная электролитическим травлением, состоит из крупных зерен различной травимости с микротвердостью 1580–2430 МПа. Помимо этого, имеются оксиды различной дисперсности. При повышении температуры наплавки до  $1100$  °С качественного изменения фазового состава и структуры покрытия не происходит.

Структура более однородная с меньшим количеством пор.

Таким образом, проведенные исследования показали, что повышение температуры наплавки от  $1050$  до  $1100$  °С не приводит к качественному изменению фазового состава и структуры покрытия. Не меняется также и микротвердость структурных составляющих. Улучшается растекание материала покрытия по основному металлу. В связи с этим можно сказать, что покрытие с подобной структурой будет устойчиво к ударным нагрузкам, однако оно имеет низкую износостойкость при интенсивном абразивном изнашивании, что связано с наличием крупнозернистой структуры и низкой твердостью фазовых составляющих.

Металлографические исследования покрытий из состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4 проводились на образцах, наплавляемых при температуре  $T = 1150$  °С (рис. 6).

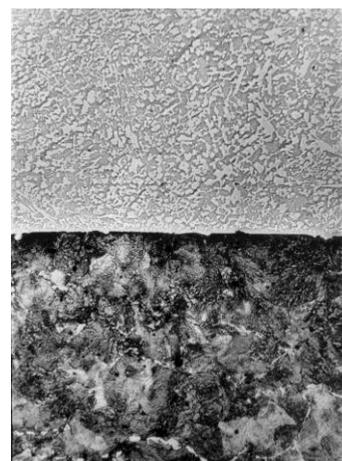


Рис. 6. Структура покрытия, полученного из состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4

Металлографические исследования показали, что покрытие хорошо сплавилось с основным металлом. Граница сплавления ровная, плотная (без раковин и зазоров). Проведенный РФА показал наличие твердых растворов на основе  $\gamma$ - и  $\alpha$ -Fe (преимущественно на основе  $\gamma$ -Fe), боридов типа  $\text{CrFe}_3\text{B}$  (или карбоборидов  $\text{CrFe}_x(\text{BC})_y$ ), карбидов типа  $\text{CrFe}_x\text{C}_y$  и эвтектики типа  $\text{CrFe}_3(\text{Si}, \text{B})$ . После электролитического травления удалось выявить структуру покрытия (рис. 6). Она состоит из дендритов, представляющих собой раствор никеля в железе, помимо этого борцементит ( $\text{CrFe}_x(\text{BC})_y$ ) с карбида-

ми хрома сложного состава (Cr, V, Fe)<sub>3</sub>C. Имеется много эвтектики Me<sub>3</sub>(Si, B) с микротвердостью 4730–6570 МПа. Микротвердость карбидов – 7374–10734 МПа, боридов – 11470–15325 МПа.

Исходя из сказанного выше очевидно, что данное покрытие обладает мягкой матрицей и твердыми выделениями упрочняющих фаз, равномерно распределенных по объему. Все это говорит о том, что покрытие должно обладать высокой износостойкостью в сочетании с ударными нагрузками.

### ВЫВОД

Проведенные испытания на ударно-абразивное изнашивание показали, что покрытия, полученные из порошковой шихты состава 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф + 30 % ПГ-СР4, имеют в 1,5–2,0 раза большую износостойкость, чем из порошков ПР-Х4Г2Р4С2Ф и ПГ-СР4. В то же время покрытие, полученное электроконтактным оплавлением, имеет износостойкость на 10–15 % выше, чем покрытие, наплавленное намораживанием из расплава. Результаты испытаний подтверждаются металлографическими исследованиями, которые показали, что

наиболее приемлемым для условий ударно-абразивного изнашивания является покрытие, полученное из порошковой шихты, состоящей из 70 % ПР-Х4Г2Р4С2Ф и 30 % ПГ-СР4. Это связано с тем, что благодаря никелю образуется мягкая матрица, обеспечивающая стойкость к ударным нагрузкам, а порошок на основе железа дает наличие твердой фазы в виде карбидов и боридов, имеющих высокую твердость и стойкость к абразивному изнашиванию.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Сборник** сводных материалов паспортизации полей, многолетних насаждений и улучшенных кормовых угодий Белорусской ССР / Гос. агропром. ком. Белорус. ССР, Респ. норматив.-исслед. станц. по труду. Респ. проект. ин-т по землеустройству «Белгипрозем». – Минск, 1987. – 24 с.
2. **Оплавление** порошкового материала при теплообмене с деталью, нагреваемой электрическим током / Ю. Н. Гафо [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 48–50.
3. **Повышение** долговечности почворежущих элементов сельскохозяйственной техники наплавкой намораживанием / Г. Ф. Бетень [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1986. – 44 с.

Поступила 18.02.2009