

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НАНОСИМЫХ НА ДЕТАЛИ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Скобло Т.С., докт. техн. наук, профессор,  
 Сидашенко А.И., канд. техн. наук, профессор, Харьяков А.В., инженер,  
 Науменко А.А., канд. техн. наук  
*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
 имени Петра Василенка)*

*В работе приведены результаты исследований по выбору порошковых композиций для нанесения износостойких покрытий на шейки коленчатых валов и шипы крестовин карданных валов. Рассмотрены особенности их формирования.*

Условия эксплуатации машин и оборудования предъявляют высокие требования к качеству, надежности и долговечности их деталей, особенно при техническом обслуживании и ремонте. По мере износа деталей уровень их свойств, как правило, снижается. Это связано с тем, что при износе рабочей поверхности имеет место некоторый спад твердости по сечению рабочего слоя и снижение физико-механических свойств, в процессе эксплуатации деталей, а также накопление и развитие повреждаемости.

Для обеспечения необходимых потребительских свойств деталей и стабильной работы машин и оборудования необходимо обеспечить получение в процессе их ремонта высокого качества рабочего слоя. Это возможно путем выбора эффективных материалов, параметров и технологии восстановления, которые бы не оказывали влияния на изменение линейных размеров при обработке, не требовали бы последующей правки, не изменяли структуры и свойств материала детали (в том числе и предварительно упрочненной сердцевины) и обеспечивали необходимые условия эксплуатации сопряжения.

К числу наиболее эффективных технологических процессов восстановления деталей, в первую очередь, относятся способы с использованием высококонцентрированных источников энергии - лазерная, плазменная, электроннолучевая и электроискровая обработки, которые не приводят к структурным и физико-механическим изменениям в подслое. Кроме того, применение этих методов, благодаря локальному нагреву поверхностного слоя, не снижают усталостной прочности восстанавливаемых деталей и обеспечивают получение необходимого по толщине слоя покрытия. У 90% деталей, особенно работающих в сопряжении, величина износа не превышает 1,0 – 1,5мм.

Наиболее доступным, с точки зрения оборудования и стоимости обработки, является плазменно-порошковый метод, который позволяет производить нанесение слоя компенсирующего износ покрытия до 2,0мм на радиус детали и не требует специальной экологической защиты. Этот метод особенно эффективен для деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, таких как ко-

ленчатые валы автотракторных двигателей и крестовины карданных валов. При нанесении покрытий этим способом имеет место быстрый, локальный разогрев детали который не приводит к ее короблению из-за перегрева.

Нанесение восстановительного покрытия этим методом может быть использовано на различных ремонтных участках и специализированных предприятиях, поскольку оборудование легко монтируется на базе любого вращателя (металлорежущего станка).

Наибольшая эффективность применения плазменного метода достигается за счет использования плазменной дуги в качестве источника тепла для предварительной обработки поверхности детали в сочетании с последующим нанесением восстановительного покрытия. Поэтому направление работ, связанное с обеспечением высокого качества восстановления деталей сельскохозяйственных машин и оборудования при использовании относительно недорогого и недефицитного оборудования, является важным и актуальным.

Целью работы являлось повышение долговечности наиболее ответственных деталей путем разработки эффективного материала и параметров технологии нанесения восстановительных покрытий с использованием плазменного метода.

Выбор композиции для восстановительных покрытий осуществляли для коленчатых валов (сталь 45) и крестовин карданных валов (сталь 30ХГТ).

При изготовлении коленчатые валы из стали 45 проходят термообработку по режиму: нормализация 850 - 870°C (выдержка в печи 2,5 – 3 ч) для формирования необходимых свойств сердцевины; затем закалка ТВЧ при 820 - 840°C, отпуск 550 - 600°C (выдержка в печи 2,5 – 3 ч). В закаленном ТВЧ слое структура представляет собой мелконгольчатый мартенсит. В переходном слое – троостомартенсит и троостит в виде сетки. После нормализации сердцевина вала состоит из сорбита и феррита.

К коленчатым валам предъявляются следующие технические требования. Микроструктура слоя термически обработанного вала должна быть однородной, мелкозернистой, не обезуглероженной (без прослоек и сетки феррита на расстоянии не менее 8 мм от поверхности шейки).

Твердость шеек более 52 HRC. Глубина упрочненного слоя не менее 2,5мм;  $\sigma_s = 830 - 850$  МПа.

Предел выносливости  $\sigma_{-1} \geq 110$  МПа.

Шипы крестовин помимо циклических нагрузок, дополнительно испытывают и ударные. Поэтому на их рабочей поверхности после эксплуатации остаются вмятины от роликов игольчатых подшипников. Износ этих деталей значительный (до 1,0 мм) и неравномерный. Они должны обладать повышенной вязкостью и хорошо сопротивляться истиранию. При изготовлении такие детали подвергаются цементации. Глубина цементованного слоя составляет 0,6...1,0мм, а твердость должна соответствовать 57...65HRC.

Требования к рабочей поверхности: отсутствие резкого перехода от цементованного слоя к сердцевине. В наружной зоне цементованного слоя не должно быть сплошной цементитной сетки [1].

Исходя из требований, предъявляемых к коленчатым валам и крестови-

нам карданных валов подбирали порошковые композиции [2], которые бы по уровню свойств при восстановлении были близки к новым деталям. В связи с этим оценивали влияние состава и параметров нанесения покрытий плазменно-порошковым методом на угар химических элементов. Покрытие наносили смесью порошковых композиций на основе железа, легированных хромом, никелем и молибденом (табл. 1).

Таблица 1

Содержание компонентов в используемых порошках

Марка порошка	Содержание компонентов, %.								
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	B	Mo	Cu
ФМИ-2	Осн.	0,77	2,62	4,49	10,43	-	2,87	-	-
ПЖН4Д2М	Осн	0,054	0,05	0,1	-	3,62	-	0,5	1,68

Для исследований использовали вырезанные из деталей образцы, которые подвергали отжигу для стабилизации структуры и снятия напряжений после эксплуатации.

Сопоставительными исследованиями нанесения покрытий с использованием различной доли приведенных порошковых материалов установлено [2], что для удовлетворения требованиям технических условий наиболее эффективной является композиция, состоящая из 40%ФМИ – 2 + 60%ПЖН4Д2М, что обеспечивает достижение требуемой твердости равной 52 – 55 HRC.

Для обеспечения требований по твердости рабочего слоя крестовин на уровне 57 – 65HRC рекомендовано для покрытия использовать порошковую композицию, состоящую из 50% ФМИ – 2 + 50% ПЖН4Д2М.

Выполнен анализ влияния температурных параметров обработки. Определено [3], что при обработке током в интервале значений 120 – 150 А падение концентрации всех элементов было существенным: для Ni составило 29,47%, а Cr – 26,53%. При нанесении покрытий по режиму: ток в диапазоне 150 – 180 А величина угара легирующих элементов, изменяется незначительно, и они распределяются по сечению покрытия более равномерно. В этом интервале температур, концентрация химических элементов снижалась, по сравнению с первым (ток 120 – 150А), незначительно и не превышала 0,58% и 5,55% для Ni и Cr соответственно.

Покрытия, состоящие из оптимальных соотношений порошковых композиций для коленчатых валов (40% ФМИ – 2 + 60% ПЖН4Д2М) и крестовин карданных валов (50% ФМИ – 2 + 50% ПЖН4Д2М) обеспечивают однородную структуру с дисперсными дендритами без видимых пор, трещин и частиц нерасплавленного порошка. Основной структурой покрытия является аустенит с небольшой долей феррита и карбидами.

Электронно-микроскопическими исследованиями [4] с применением микродифракционного анализа, а также микрорентгеноспектральным анализом выявлен тип формируемых фаз и содержание легирующих элементов в карбидной фазе покрытия. Упрочняющей фазой являются дисперсные специальные карбиды (Cr, Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> и карбиды цементитного типа (Fe, Cr)<sub>3</sub>C. Доля упрочняю-

шей фазы в покрытиях оптимального состава равна 6 – 8%.

Установлено, что в специальных карбидах  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  содержание Cr достигает около 44,0%, а в карбидах цементитного типа  $(Fe, Cr)_3C$  – его доля не превышает 13% [4].

Исследования показали [5], что износостойкость данного покрытия на 68% выше, чем у деталей, изготавливаемых по существующей технологии.

Также методом рентгеноструктурного анализа (табл. 2) было установлено, что в покрытии формируются структура мартенсита, остаточного аустенита, феррита, а также выделяются карбиды и нитриды  $(Fe_2N)$ .

Методом планирования эксперимента, согласно плану  $2^2$  (табл. 3) также оценена величина переходной зоны (ее однородность) в зависимости от параметров обработки для варианта нанесения покрытий с предварительным отжигом плазменной струей поверхности обрабатываемой детали при  $t = 850^\circ C$ .

Количество аустенита определяли по формуле

$$C_\gamma = \frac{300 \cdot \rho_\gamma / \rho_a}{3 \cdot \rho_\gamma / \rho_a + 2}, \%$$

где  $\rho_\gamma$  - количество фазы  $\gamma$  Fe,  $\rho_a$  - количество фазы  $\alpha$  Fe.

До эксплуатационных испытаний  $C_\gamma$  составило – 50%, после испытаний  $C_\gamma$  – 15%.

Таблица 2

Результаты рентгеноструктурного исследования

Угол скольжения, град	Интенсивность линий	Угол дифракции, град	Расстояние между линиями	Фазы, интенсивность линий
2 $\Theta$	l	$\Theta$	d	$\Phi$
53,2	слабая	26,6	2,558	$Fe_3O_4$ (2,53) 100
65,5	средняя	32,75	2,1174	$Fe_3O_4$ (2,10) 32
89,5	средняя	44,75	1,6270	$Fe_3O_4$ (1,61) 64
126	средняя	63	1,2856	$Fe_3O_4$ (1,279) 20
145	сильная	72,5	1,2010	$Fe_3O_4$ (1,21) 5
148	сильная	74	1,1916	
			2,02	$\alpha$ - Fe
			2,08	$\gamma$ - Fe
			1,80	$\gamma$ - Fe
			1,43	$\alpha$ - Fe $Fe_3O_4$ (1,48) 80
			1,28	$\gamma$ - Fe
			1,17	$\alpha$ - Fe

Матрица планирования эксперимента 2<sup>2</sup>

Номер режима	Скорость вращения детали $V$ , об/мин	Величина силы тока $I_{св}$ , А	Протяженность переходной зоны, $L$ , мкм
1	+1 (3,8)	+1 (260)	50
2	-1 (2,8)	-1 (200)	160
3	+1 (3,8)	-1 (200)	250
4	-1 (2,8)	+1 (260)	95

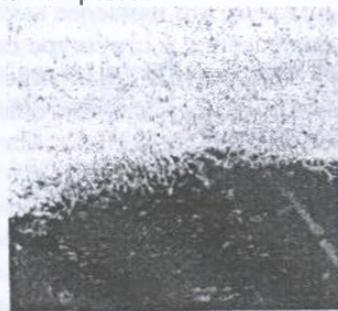
На основе экспериментальных исследований получено уравнение регрессии:

$$L = 138,75 + 11,25 \cdot V - 6,26 \cdot I - 67,5 \cdot V \cdot I.$$

Из приведенных данных видно, что при предварительном подогреве увеличение скорости обработки приводит к росту неоднородности структуры, а увеличение силы тока ее уменьшает. Анализ микроструктуры выявил, что при скорости обработке 3,8 об/мин и силе тока 200 А имеет место максимальная неоднородность структуры (оценивали по наличию в ней доли карбидов) в переходной зоне. В этом случае она характеризуется протяженностью от 150 до 250 мкм (рис. 1 а, б). В остальных случаях такая зона не превышает 50 – 160 мкм.

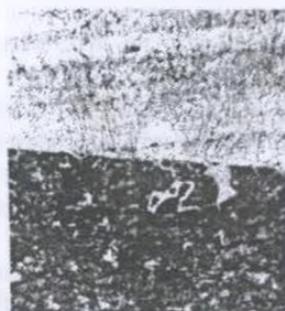


а



б

Рис. 1 Микроструктура переходной зоны образцов шеек коленчатых валов, восстановленных по режиму 3 ( $\times 100$ ).



а



б



в

Рис. 2 Микроструктура переходной зоны образцов шеек коленчатых валов восстановленных по режиму 2. (а, б  $\times 100$ , в  $\times 500$ ).

При минимальных значениях таких параметров выявлены лишь отдельные зоны по формированию карбидной фазы в основном металле (рис. 2 а, б) и глубина их формирования от границы раздела покрытие – основной металл находится в пределах 30 – 160 мкм. Кроме того, на границе формировалась прерывистая карбидная полоса размером ~ 20 мкм, которая может снижать прочность сцепления.

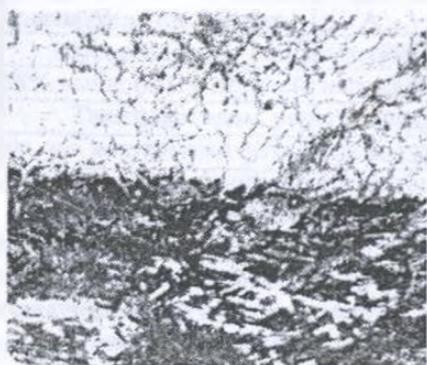


Рис. 3 Микроструктура переходной зоны образца шейки коленчатого вала восстановленного по режиму Г (× 100).

Структура покрытия дендритная. Четко выявляется карбидная сетка по границам ветвей дендритов (рис. 2 в).

При максимальных значениях скорости обработки ( $V=3,8$  об/мин и  $I=260$  А) зона сплавления не ровная, карбидные включения в переходной зоне не превышают 50 мкм, а в покрытии отсутствует четко выраженная дендритная направленность (рис 3).

### Выводы.

Показано, что наиболее высокая износостойкость деталей обеспечивается при формировании в структуре специальных карбидов и  $Me_{23}C_6$ , а также легированного цементита. Доля упрочняющей фазы составляет 6 – 8%. Методом микрорентгеноспектрального анализа установлено, что  $(Cr, Fe)_{23}C_6$  содержит 43,9% Cr,  $(Fe, Cr)_3C$  – 13% Cr. Матрица представляет собой феррито-перлитную структуру.

Методом рентгеноструктурного анализа показано, что в покрытиях нанесенных плазменно-порошковым методом формируются структуры мартенсита, остаточного аустенита, феррита, карбиды и нитриды ( $Fe_2N$ ).

Установлено, что оптимальными параметрами обработки для нанесения покрытий на шейки коленчатого вала СМД – 60 (Сталь 45, Ø 86мм) являются: ток  $I = 230$  А, скорость вращения детали  $V=2,8$  об/мин, температура предварительного подогрева  $T = 200^\circ C$ .

### Список литературы

1. Блантер М.Е. Металловедение и термическая обработка. М.: Машгиз, 1963, 416 с.
2. Скобло Т.С., Сидашенко А.И., Харьяков А.В., Науменко А.А. Влияние химического состава порошковых композиций и параметров плазменной обработки на свойства покрытий при восстановлении деталей // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Випуск 35. - Кіровоград: КНТУ. – 2005. – С. 383 – 388.
3. Харьяков А.В. Исследования влияния режимов плазменно-порошковой наплавки на качество восстановления крестовин карданных валов. Вестник Национального технического университета «ХПИ» Тематический сборник научных работ «Новые решения в современных технологиях». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. - № 15. – С. 66 – 72.

4. Харьяков А.В. Особенности формирования восстановленного слоя при плазменно-порошковой наплавке коленчатых валов двигателей СМД – 60. . Вестник Национального технического университета «ХПИ» Тематический сборник научных работ «Новые решения в современных технологиях». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2000. - № 81. – С. 51 – 52.
5. Скобло Т.С., Сидашенко А.И, Харьяков А.В.Мартыненко А.Д. Износостойкость коленчатых валов тракторных двигателей. Труды 8 – й международной научно-технической конференции «Физические и компьютерные технологии». Харьков: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 163 – 166.

#### Анотація

**Особенности формирования структуры износостойких покрытий, которые наносятся на детали из среднеуглеродистых и низколегированных сталей**

*У роботі приведені результати досліджень по вибору порошкових композицій для нанесення износостойких покриттів на шийки колінчастих валів і штильки хрестовин карданних валів. Розглянуті особливості їх формування.*

#### Abstract

**Features of forming of structure of wearproof coverages inflicted on a detail from middlecarbon and low alloyed steels**

*In work the results of researches are resulted on the choice of powder-like compositions for causing of wearproof coverages on the necks of crankshafts and thorns of cross-pieces of cardan billows. The features of their forming are considered.*