

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

© 2024 г. Д. А. Миронов, кандидат технических наук, А. К. Ламм,
Р. К. Расулов, младшие научные сотрудники

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: nano.otdel@mail.ru

Одна из технологий повышения ресурса рабочих органов – нанесение упрочняющего слоя материалом, более устойчивым к износу. Исследование проводили с целью оценки эффективности метода селективного лазерного спекания (SLS) при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов. В качестве варианта сравнения рассматривали метод плазменно-порошковой наплавки. Исследования проводили на круговом почвенном стенде, представляющем собой вращающийся в цилиндре, наполненном абразивной средой для быстрого изнашивания поверхности, ротор со стойками, на которые крепили образцы. Изучали 4 экспериментальных образца из стали 30ХГСА. Размеры упрочняющего слоя определяли расчетным путем. После этого его наносили металлическим порошком марки Р6М5 методом SLS на 2 образца, один упрочняли до термической обработки, второй после. Аналогично, но с использованием порошка ФБХ-6-2, изготавливали 2 образца путем плазменно-порошковой наплавки. Время стендовых испытаний составляло 152 ч. Линейный износ образцов при упрочнении методом SLS до термообработки составил 1,3 мм, после термообработки – 0,83 мм, плазменным методом – соответственно 1,1 мм и 1,2 мм. Наибольшие показатели твердости в опыте отмечены при использовании SLS метода в зоне упрочняющего слоя: у образца, упрочненного до термообработки, – 65 HRC, после ее проведения – 73 HRC. При плазменном методе наблюдали значительные различия в твердости около упрочняющего слоя: при упрочнении до термообработки – 45 HRC, после – 35 HRC. Использование метода селективного лазерного спекания для упрочнения лезвийной части экспериментальных образцов обеспечило снижение расхода металлического порошка, в сравнении с плазменным методом, на 32 %, повышение износостойкости образцов по расчетным данным – на 26 %, на круговом почвенном стенде – на 24 %.

RESEARCH OF THE METHOD OF SELECTIVE LASER SINTERING FOR STRENGTHENING SOIL TILLAGE WORKING ORGANS

D. A. Mironov, A. K. Lamm, R. K. Rasulov

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: nano.otdel@mail.ru

One of the technologies for increasing the service life of working bodies is applying a hardening layer with a material that is more resistant to wear. The study was conducted to evaluate the efficiency of the selective laser sintering (SLS) method for hardening soil-cultivating working bodies. The plasma-powder surfacing method was considered as a comparison option. The studies were conducted on a circular soil test bench, which was a rotor with racks rotating in a cylinder filled with an abrasive medium for rapid surface wear, on which samples were attached. Four experimental samples made of 30KhGSA steel were studied. The dimensions of the hardening layer were determined by calculation. After that, it was applied with P6M5 metal powder using the SLS method to 2 samples, one was hardened before heat treatment, the second after. Similarly, but using FBH-6-2 powder, 2 samples were made using plasma-powder surfacing. The bench test duration was 152 h. The linear wear of the samples when hardened by the SLS method before heat treatment was 1.3 mm, after heat treatment – 0.83 mm, by the plasma method – 1.1 mm and 1.2 mm, respectively. The hardness values that stand out from the others, with the SLS method are observed in the hardening layer zone: the sample before heat treatment is 65 HRC, after it – 73 HRC. With the plasma method, the difference in hardness is observed in the zone near the hardening layer: before heat treatment – 45 HRC, after – 35 HRC. The use of the selective laser sintering method for hardening the blade part of the experimental samples ensured a decrease in the consumption of metal powder, in comparison with the plasma method, by 32 %, an increase in wear resistance of the samples according to the calculated data – by 26 %, on the circular soil stand – by 24 %.

Ключевые слова: рабочие органы, почвообрабатывающие машины, экономическая эффективность использования, метод селективного лазерного спекания.

Keywords: working bodies, tillage machines, economic efficiency of use, selective laser sintering method.

Обработка почвы при производстве сельскохозяйственной продукции – одна из особенно важных и энергозатратных операций. От качества ее проведения зависит урожайность сельскохозяйственных культур. В свою очередь качество обработки почвы определяют характеристики машин и орудий, которые зависят от состояния и параметров рабочих органов [1, 2, 3]. Последние эксплуатируются в почвенной среде с большим содержанием абразивных частиц, в результате чего по мере увеличения объема выполненной работы воз-

растает износ рабочего органа, при этом меняются его форма и линейные размеры, что отрицательно влияет на агротехнические характеристики выполняемых операций и увеличивает нагрузку на агрегат [4, 5]. В связи с изложенным повышение эксплуатационных параметров и наилучшее формирование лезвийной части рабочих органов почвообрабатывающих машин – важная и актуальная задача.

В последние годы активно развивается технология SLS – Selective Laser Sintering, которая подразумевает пе-

чать CAD (Computer-aided design) -моделей из металла. Ее можно в том числе рассматривать как перспективный способ изготовления рабочих органов машин для обработки почвы и нанесения на них упрочняющего слоя. Селективное лазерное спекание, в отличие от традиционных методов наплавки, позволяет наносить слои любой конфигурации с равномерным распределением твердых частиц металлопорошка. Нанесение тонкого упрочняющего слоя снижает риск возникновения широкой затылочной фаски, улучшая качество обработки почвы [2].

Один из основных недостатков существующих методов нанесения покрытий при упрочнении рабочих органов – неравномерная микротвердость наплавляемого слоя из-за того, что частицы вольфрама при проведении технологической операции наплавки не успевают полностью раствориться в ванне жидкого металла и концентрируются на дне расплава. При наплавке пилотная дуга, постоянно горящая между вольфрамовым электродом и соплом плазматрона, оказывает мощное тепловое воздействие не только на порошок, подаваемый в плазменную струю, но и на металл ванны в зоне упрочнения, что вызывает перегрев сплава и основы детали [6, 7, 8].

Нанесение покрытий при упрочнении рабочих органов методом селективного лазерного спекания (SLS) не требует полного расплавления частиц тугоплавкого материала и последующей термической обработки, так как интенсивность теплового излучения недостаточна для изменения свойств материала основы. Его преимущество заключается в возможности формирования покрытия любой конфигурации толщиной от 1 мм.

Цель исследования – оценить эффективность метода селективного лазерного спекания (SLS) при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов.

Методика. Для формирования двухслойного лезвия экспериментального образца использовали два метода: селективное лазерное спекание (SLS), которое предусматривает нанесение упрочняющего слоя на основу детали 3D металлопорошковым принтером, и в качестве варианта сравнения плазменно-порошковую наплавку в среде сжатого воздуха как наиболее распространенный на сегодняшний день метод нанесения защитного слоя.

Для проведения сравнительных исследований по определению износостойкости экспериментальных деталей были изготовлены 4 образца из стали 30ХГСА (ГОСТ 4543-2016), используемой при производстве рабочих органов для обработки почвы. Образцы № 1 и № 4 упрочняли методом плазменно-порошковой наплавки с использованием металлического порошка марки ФБХ-6-2. Образец № 4, изготовленный по стандартной технологии, выступал в роли контрольного, с которым в последующем проводили сравнение. Образцы № 2 и № 3 упрочняли методом селективного лазерного спекания (SLS). Он дает возможность использовать порошки с более высокой тугоплавкостью и твердостью, увеличивая ресурс и снижая толщину наносимого слоя. Поэтому на экспериментальные образцы наносили металлический порошок Р6М5 со сферическими частицами среднего размера от 40 до 110 мкм. Спекание проводили при мощности лазера 350 Вт; скорости сканирования – 0,03 м/с; расстоянии между дорожками сканирования – менее 100 мкм; толщине слоя при спекании – 450 мкм; стратегии сканирования – односторонняя.

Упрочнение образцов № 2 и № 4 осуществляли в соответствии со стандартной технологией производства почвообрабатывающих рабочих органов, которая предусматривает нанесение упрочняющего слоя перед термообработкой (закалка с последующим отпуском)

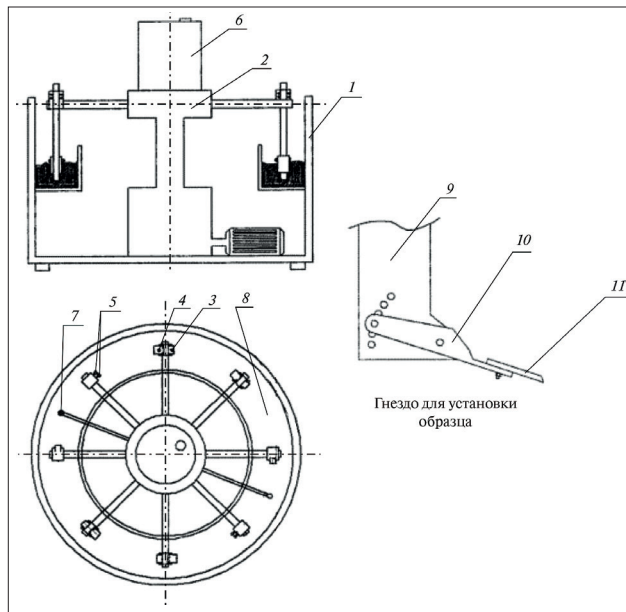


Рис. 1. Круговой почвенный стенд: 1 – каркас, 2 – приводной механизм, 3 – уплотнительные катки, 4 – грузы, 5 – рыхлители, 6 – резервуар для воды, 7 – капельница, 8 – круговой почвенный канал, 9 – приспособление для крепления испытуемых образцов, 10 – гнездо для установки образца, 11 – испытуемый образец.

рабочих органов. Образцы № 1 и № 3 подвергали термообработке до нанесения упрочняющего слоя.

Эффективность упрочнения оценивали на круговом почвенном стенде (рис. 1), конструкция которого предусматривает монтаж до двух образцов одновременно. Результаты таких испытаний сопоставимы с полевыми [9]. В процессе испытаний каждый из образцов подрезает пласт абразивной массы, имитирующей почву, которой наполнен канал, что вызывает их износ. Рыхлители 5 разрушают подошву после прохождения образцов, обеспечивая однородную твердость и влажность среды. Это позволяет поддерживать равномерную плотность массы над и под образцами, благодаря чему лезвие изнашивается аналогично почворезущим деталям в реальных условиях. Для уравнивания влажности в разрыхленный слой подается вода из резервуара 6 через капельницу 7. Уплотнительные катки 3 с грузами 4 обеспечивают постоянную плотность почвы в канале [10].

Лабораторные испытания проводили в следующих условиях: абразивная масса – песок крупный (80 %) + глина (20 %), скорость перемещения образцов – 2 м/с,

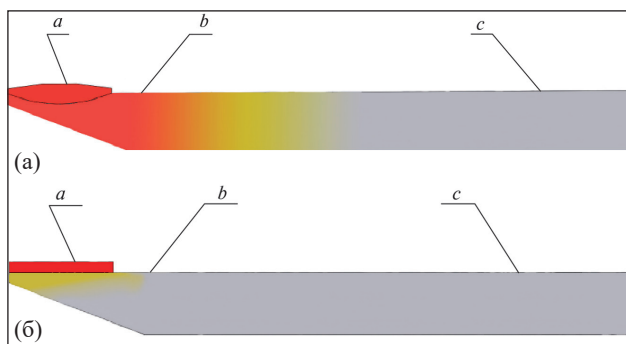


Рис. 2. Модель нагрева образца при упрочнении: а) плазменно-порошковой наплавкой (образец № 1, № 4); б) селективным лазерным спеканием (образец № 2, № 3): а – зона защитного слоя, б – 10 мм от наплавки, с – основа образца.

Табл. 1. Показатели твердости в зависимости от метода нанесения упрочняющего слоя и времени термообработки, HRC

Зона	Упрочнение до термообработки			Упрочнение после термообработки		
	начальное состояние	упрочнение	термообработка	начальное состояние	термообработка	упрочнение
SLS						
	образец № 2			образец № 3		
a	-	72,6	65	-	-	73
b	14,8	14,6	45,3	14,8	43,3	43,4
c	14,2	14,3	43,4	14,2	44,4	44,2
Плазма						
	образец № 4			образец № 1		
a	-	61,3	62	-	-	61
b	15,6	13,7	45	14,8	43,5	35
c	15	14,6	44	14,4	43,2	44,5

глубина хода образцов – 14...15 см, цикл испытаний – 152 ч, размеры образцов – 6×30×60мм.

Поверхностную твердость основы образца и его упрочняющего покрытия определяли методом измерения твердости по Роквеллу в соответствии с ГОСТ 9013-59 (ИСО 65-86) на твердомере HDRVU-187,5 (Китай). Измерение твердости проводили в зоне защитного слоя (рис. 2а) и зоне основы образца (см. рис. 2с). Кроме того, было выдвинуто предположение, что при нанесении защитного слоя методом плазменной порошковой наплавки металл может потерять твердость (отпуститься), для его уточнения проводили замеры на расстоянии 10 мм от места наплавки (зона b).

Для определения конструктивно-материаловедческих параметров экспериментальных образцов проводили расчет толщины защитного слоя по упрощенной методике, разработанной С. А. Сидоровым [9], которая базируется на учете максимальной линейной и конструктивной износостойкости. В ее основе лежит формула для сравнительной оценки линейного износа двухслойного почворезущего лезвия, точность вычислений с использованием которой составляет 12...17%:

$$U_{\text{лин.1}} = U_{\text{лин. двухсл}} \cdot \left(\frac{K_{U_2}}{K_{U_1}} \right)^{0,5...0,6} \cdot \left[1 + K_{U_{\text{ТВ.СПЛ}}} \cdot \frac{h_{\text{ТВ.СПЛ}}}{b_{\text{осн}}} \right]^{0,7...0,8}, \quad (1)$$

где $U_{\text{лин.1}}$ – линейный износ однородного почворезущего лезвия, изготовленного из материала с коэффициентом относительной износостойкости K_{v1} , в определенных почвенно-климатических условиях, мм; $U_{\text{лин. двухсл}}$ – линейный износ двухслойного упрочненного наплавленного почворезущего лезвия в тех же почвенно-климатических условиях, мм; K_{U_2} – коэффициент относительной износостойкости материала основы двухслойной детали (стали) повышенной (или пониженной), по отношению к сравниваемому (K_{U_1}) материалу; $K_{U_{\text{ТВ.СПЛ}}}$ – коэффициент относительной износостойкости материала упрочняющего твердосплавного слоя; $h_{\text{ТВ.СПЛ}}$ – толщина слоя твердого сплава двухслойного лезвия, мм; $b_{\text{осн}}$ – толщина материала основы (стали) двухслойного лезвия, мм.

После проведения лабораторных испытаний на круговом почвенном стенде рассчитывали относительную износостойкость образцов, полученных с использованием каждого метода. Ее определяли как отношение линейных износов [9].

На износостойкость также влияет правильное формообразование изнашивающегося лезвия. Для его достижения у двухслойного лезвия рабочего органа почвообрабатывающего агрегата износ основы детали в процессе эксплуатации должен быть несколько выше, чем у наплавленного слоя. При этом наплавка должна сопротивляться образованию затылочной фаски, чтобы сохранить остроту лезвия [12, 13, 14].

Для определения износостойкости твердосплавного покрытия используется следующая формула:

$$K_{\text{ли}} = \frac{U_{\text{лСер.}}}{U_{\text{лОп.}}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{ли}}$ – коэффициент линейной износостойкости; $U_{\text{лСер.}}$ – линейный износ монометаллического (серийного) фрагмента, мм; $U_{\text{лОп.}}$ – линейный износ опытного двухслойного наплавленного фрагмента, мм.

Ранее было установлено, что линейный износ монометаллического образца составляет 3,2 мм. Эта величина была принята за эталон [5]. Испытания упрочненных экспериментальных образцов проводили в соответствии с Программой и методикой лабораторных испытаний твердосплавных материалов ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [9, 10, 11].

Результаты и обсуждение. В ходе многолетних исследований выявлено, что достаточно хорошие условия формообразования лезвийной части рабочих органов наблюдаются при соотношении линейных износов однослойного и двухслойного почворезущих рабочих органов, равном 1,7...1,8 [9, 11].

Приняв, что $K_{U_2} = K_{U_1}$, то есть материал основы сравниваемых образцов идентичен, получим:

$$\frac{U_{\text{лин.1}}}{U_{\text{лин. двухсл}}} = \left[1 + K_{U_{\text{ТВ.СПЛ}}} \cdot \frac{h_{\text{ТВ.СПЛ}}}{b_{\text{осн}}} \right]^{0,7...0,8} > 1,7...1,8. \quad (3)$$

После упрощения формула (2) примет вид:

$$h_{\text{ТВ.СПЛ}} > \frac{1,38 b_{\text{осн}}}{K_{U_{\text{ТВ.СПЛ}}}}. \quad (4)$$

Для экспериментальных образцов толщина материала основы ($b_{\text{осн}}$) равна 6 мм.

С учетом того, что для металлического порошка марки ФБХ-6-2 усредненное значение $K_{U_{\text{ТВ.СПЛ}}}$ равно 4,05, зависимость (3) примет вид:

$$h_{\text{ТВ.СПЛ}} > \frac{1,38 \cdot 6}{4,05}, \text{ то есть } h_{\text{ТВ.СПЛ}} > 2,1 \text{ мм.}$$

Табл. 2. Результаты сравнительных лабораторных испытаний твердосплавных покрытий на круговом почвенном стенде

Образец и марка твердосплавного покрытия	Способ упрочнения	Твердость, HRC	Толщина покрытия, мм	Средний линейный износ, мм		Коэффициент линейной износостойкости ($K_{\text{лин}}$)
				с покрытием	без покрытия (эталона)	
№ 2 Р6М5	селективное лазерное спекание	61...65	1,44	1,30	3,2	2,29
№ 3 Р6М5		70...73	1,44	0,83		3,80
№ 1 ПП-ФБХ-6-2	плазменная наплавка	59...61	2,10	1,20		2,70
№ 4 ПП-ФБХ-6-2		59...62	2,10	1,10		2,90

Для твердого сплава Р6М5 усредненное значение $K_{U_{тв.спл.}}$ равно 6,5, тогда:

$$h_{тв.спл.} > \frac{1,38 \cdot 6}{6,5}, \text{ то есть } h_{тв.спл.} > 1,44 \text{ мм.}$$

Износ двухслойного лезвия экспериментального образца можно приближенно (с точностью 12...15%) определить по зависимости [9]:

$$U_{\text{лезв. двухсл.}} = \frac{\lambda (1,1 + 1,05 \cdot T^{1,25})}{K_{U_{тв.спл.}} \cdot h_{тв.спл.}^{0,5}} \cdot \tau, \quad (5)$$

где λ – математическое описание изнашивающей способности почвы (определяется по методике Сидорова С. А. [9]), мм/га; T – твердость почвы на глубине обработки, МПа; $K_{U_{тв.спл.}}$ – коэффициент относительной износостойкости твердого сплава (относительно материала основы лемеха); $h_{тв.спл.}$ – толщина твердосплавного упрочняющего слоя, мм; τ – наработка на лемех, га.

Величина показателя λ определяется по следующей эмпирической зависимости:

$$\lambda = (X^2 + 0,8 \cdot Y + 1,5 \cdot Z) \cdot T^{\frac{1}{4}}, \quad (6)$$

где X , Y , Z – содержание в почве (по массе), соответственно, песка, глины и мелких каменных включений (гравия, гальки и др.) в долях единицы, то есть $X+Y+Z=1$ (100%).

Исходя из условий испытаний, $X=0,8$, $Y=0,2$ и $Z=0$.

Рассчитаем λ по толщине элементарной площадки для кругового почвенного станда:

$$\lambda = (0,8^2 + 0,8 \cdot 0,2 + 1,5 \cdot 0) \cdot 1^{\frac{1}{4}} = 0,64 \text{ мм/га.}$$

С учетом этого износ двухслойного лезвия экспериментального образца, наплавленного твердым сплавом ПР-ФБХ-6-2, будет равен:

$$U_{\text{лезв. двухсл.}} = \frac{0,64 (1,1 + 1,05 \cdot 1^{1,25})}{4 \cdot 2,1^{0,5}} \cdot 6 = 1,42 \text{ мм;}$$

образца, наплавленного твердым сплавом Р6М5, –

$$U_{\text{лезв. двухсл.}} = \frac{0,64 (1,1 + 1,05 \cdot 1^{1,25})}{6,5 \cdot 1,44^{0,5}} \cdot 6 = 1,05 \text{ мм.}$$

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин методом селективного лазерного спекания приводит к сокращению использования твердого сплава на 32 % и увеличению износостойкости на 26 %.

Уменьшение твердости образца № 1 с предварительной термообработкой, упрочненного плазменно-порошковой наплавкой, в зоне б составило около 10 единиц HRC (табл. 1). Это обусловлено тем, что материал вокруг упрочненного слоя подвергся отпуску в процессе упрочнения, которое происходит при больших температурах. Аналогичную потерю твердости наблюдали у образца № 4. При замерах в зоне б после упрочнения она в среднем была меньше на 2 единицы HRC. Но после закалки с последующим отпуском все вернулось в норму.

Исследование образца № 3 подтвердило результаты априорного анализа [9, 11], согласно которым при спекании не требуется дальнейшего проведения технологической операции закалки. У упрочненного слоя этого образца (зона а) отмечена максимальная в опыте твердость. Кроме того, подтвердилось незначительное температурное воздействие и отсутствие перегрева зоны б, о чем свидетельствует незначительное снижение ее твердости (менее 1 единицы HRC). У образца № 2

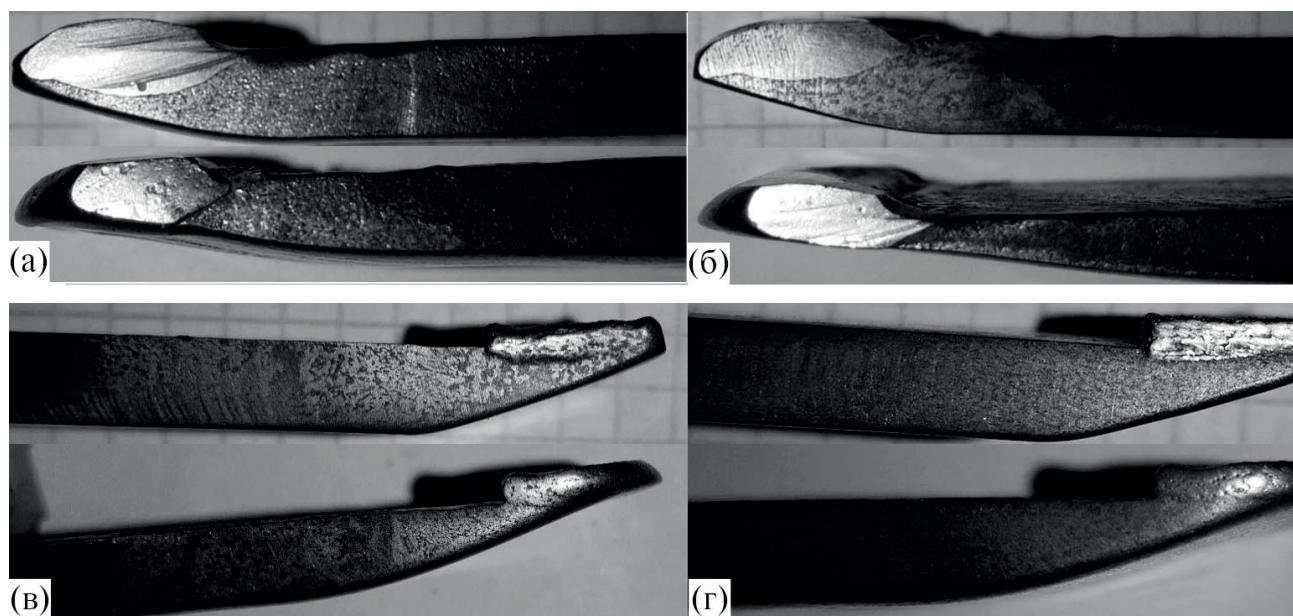


Рис. 3. Экспериментальные образцы (верх – первоначальное состояние, низ – изношенное состояние), упрочненные методом плазменно-порошковой наплавки в среде сжатого воздуха (а – образец № 4; б – образец № 1) и методом селективного лазерного спекания (в – образец № 2; г – образец № 3).

нанесение упрочняющего слоя с последующей закалкой сопровождалось уменьшением твердости упрочняющего слоя (зона а) на 7 единиц HRC. При этом параметры твердости основы после закалки находились в требуемых границах для рассматриваемого материала.

Анализ образца № 1, наплавленного плазменным методом после термообработки, подтвердил предположение о повышенном тепловложении, из-за которого происходит потеря твердости около защитного слоя в зоне б (см. рис. 2а). В результате его основа визуально (рис. 3) изнашивалась сильнее, чем у образца № 4, который упрочняли перед термообработкой. Этот факт подтверждает и более высокий (на 0,1 мм) линейный износ образца № 1 (1,2 мм) по сравнению с образцом № 4 (табл. 2). Износостойкость образца № 1 была меньше, чем у образцов № 3 и № 4.

Сравнение деталей, наплавленных методом SLS, показало, что у образца № 2 линейный износ (1,3 мм) был больше, чем у образца № 3, на 0,47 мм, поскольку упрочняющий слой под воздействием термообработки потерял часть твердости, то есть уменьшилась его способность противостоять износу. В целом наибольшую износостойкость, по сравнению с другими образцами, продемонстрировал образец № 3.

Выводы. При проведении термообработки перед нанесением упрочняющего слоя методом плазменно-порошковой наплавки происходит потеря твердости в зоне 10 мм от наплавки на уровне 10 HRC. Использование метода селективного лазерного спекания (SLS) дает возможность решить эту проблему. При его использовании аналогичной потери твердости не наблюдали.

Результаты исследований подтвердили высокий ресурс и эффективность применения селективного лазерного спекания с использованием новых твердых сплавов для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих орудий.

При использовании метода селективного лазерного спекания экономия твердого сплава составляет 32 %, износостойкость экспериментальных образцов в сравнении с деталями, упрочненными плазменным методом, по расчетным данным возрастает на 26 %, по результатам лабораторных исследований в круговом почвенном канале – на 24 %.

Литература.

1. Сидоров С. А. Сельхозмашиностроению – качественные материалы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2010. № 2. С. 41.
2. Миронов Д. А., Ламм А. К., Расулов Р. К. Оценка эффективности почвообрабатывающих рабочих органов по критерию износостойкости // *Вестник Башкирского государственного аграрного университета*. 2023. № 1 (65). С. 145–150.
3. Миронова А. В. Технологические и физико-механические свойства задерненных почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 1. С. 63–68.
4. Миронова А. В. Обработка задерненных и деградированных почв // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. № 2 (35). С. 57–62.
5. Лискин И. В., Миронова А. В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почво-режущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. № 3. С. 53–58.
6. Повышение ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию долот лемехов наплавкой электродами с борсодержащей обмазкой / В. Ф. Аулов, В. П. Лялякин, А. М. Михальченко и др. // *Сварочное производство*. 2019. № 7. С. 28–31.
7. Новые виды коррозионно-стойких биметаллов и технологии их производства / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, С. А. Сидоров и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2014. № 4. С. 7–12.
8. Лялякин В. П., Слинко Д. Б., Денисов В. А. Получение композиционных покрытий электродуговым напылением порошковыми проволоками // *Технология металлов*. 2021. № 12. С. 16–21.
9. Сидоров С. А. Применение наноплазменных технологий нанесения покрытий и обработки материалов деталей сельхозмашин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. № 2. С. 42–44.
10. Сидоров С. А., Миронов Д. А., Лискин И. В. Круговой почвенный стенд. Патент на изобретение RU 2613292 С, 15.03.2017. Заявка № 2015154117 от 17.12.2015.
11. Лобачевский Я. П., Старовойтов С. И. Оптимальный профиль передней поверхности чизельного рабочего органа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. № 2. С. 26–30.
12. Старовойтов С. И., Гринь А. М. Плужный корпус для прецизионной обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. № 1. С. 47–52.
13. Анализ тягового сопротивления элементов цилиндрического плужного корпуса / Я. П. Лобачевский, В. Ф. Комогорцев, С. И. Старовойтов и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. № 2. С. 11–15.
14. The trend of tillage equipment development / S. I. Starovoytov, B. H. Akhalaya, S. A. Sidorov et al. // *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51. No. 3. P. 77–81.

Поступила в редакцию 23.05.2024

После доработки 24.07.2024

Принята к публикации 25.09.2024