

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hrininh K. Investigation the process of super fine grinding of component of pharmaceutical and cosmetic products on the bead mill / K. Hrininh, R. Hordeichuk, O. Gubenia // Proceedings of University of Ruse. – 2018. – Volume 57, Book 10.3.
2. Mende S., Rapl M. Mill performance matched to the task. Throughput enhanced by optimizing cooling and disc configuration // European Coatings Journal. – 2014. – № 12. pp. 88–91.
3. Postma P.R., Suarez-Garcia E., Safi C., Yonathan K., Oliveiri G., Barbosa M.J., Wijffels R.H., Eppink M.H.M. Energy efficient bead milling of microalgae: Effect of bead size on disintegration and release of proteins and carbohydrates // Bioresource Technology. – 2017. – Volume 224. – P. 670-679.
4. Кузнецова М.М., Мараховский М.Б., Алексина А.А. Определение энергозатрат процесса измельчения твердых материалов / М.М. Кузнецова, М.Б. Мараховский, А.А. Алексина // Журнал технической физики. – 2015. – Том 85. - № 5. – С. 145–147.
5. Кустова С.П., Бойко М.О. Розробка технології мазі Фенсуциналу // Сучасна фармацевтична технологія. – 2011. - №5 (16). – с. 71-74.

УДК. 621.891:621.793

### **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, МИКРОТВЕРДОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ**

*канд. техн. наук, доцент, О.В. Дьяченко, С.М. Криуша, ФММП БНТУ, г. Минск,*

*канд. техн. наук, доцент М.А. Кардаполова, ОНИЛ «Плазменные и лазерные технологии» БНТУ, г. Минск*

*Резюме - исследовано влияние режимов лазерной обработки на фазовый состав, микротвердость и износостойкость покрытий из нержавеющей стали без и после легирования аморфным бором и В<sub>4</sub>С.*

*Ключевые слова: лазерная обработка, фазовый состав, легирование, микротвердость, интенсивность изнашивания.*

**Введение.** Детали с покрытиями из нержавеющей стали хорошо зарекомендовали себя в условиях работы в агрессивных средах. Основным их недостатком является пониженная твердость и износостойкость.

Одним из методов данной проблемы является использование комбинированной технологии, включающей плазменное напыление диффузионно-легированного бором порошка ПР-Х18Н9 на основе аустенитной стали. Полученные покрытия обладают гомогенной структурой и благодаря лазерной обработке возможно управлять их свойствами. Данный метод предусматривает длительное, 3 – 5 часовое диффузионное борирование порошка из стали ПР-Х18Н9 [1]. На основании ранее проведенных экспериментальных исследований была предпринята попытка получения износостойких беспористых покрытий из шликерных обмазок [2, 3]. В процессе лазерного легирования происходит расплавление обмазки и части материала подложки. После остывания формируется зона упрочнения, состоящая из зоны затвердевшего металла и зоны термического влияния, представляющая собой область закаленного металла. Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Режимы лазерного облучения: плотность мощности излучения и его диаметр, а также концентрация легирующих компонентов в обмазке определяют строение и состав зоны термического влияния [4, 5]. На интенсивность изнашивания покрытий из порошков на железной основе могут оказывать влияние режимы лазерной обработки, а также дополнительное легирование [3, 6] Целью работы является изучение влияния параметров лазерной обработки и дополнительного легирования В<sub>AM</sub> и В<sub>4</sub>С на фазовый состав, микротвердость и износостойкость покрытий из нержавеющей стали AISI 316Lsi.

**Основная часть.** Исследованию подвергали образцы из стали 3, на которую методом гиперзвуковой металлизации (ГМ) наносили нержавеющую сталь AISI 316Lsi. Напыление осуществляли при помощи установки АМД-10. В состав установки входили металлизационный аппарат, пульт управления и блок коммутации. Давление сжатого воздуха 0,45...0,6 МПа при давлении пропан-бутана 0,25...0,4 МПа. Проволока для напыления d = 1,6 мм. Толщина нанесенного слоя составила 0,6 мм. Использовали покрытие из нержавеющей стали AISI 316Lsi без и с нанесенным слоем легирующих обмазок В<sub>AM</sub> и В<sub>4</sub>С. Оплавление образцов осуществляли лазером ЛГН-702 мощностью N = 800 Вт при диаметре пятна лазерного луча от 1 до 2 мм со скоростями перемещения от 100 мм/мин до 1500 мм/мин. Для исследования фазового состава использовался рентгеновский дифрактометр ДРОН – 3,0, при скорости поворота образца 1 град/мин в медном монохроматизированном излучении в максимально возможном интервале углов от 10° до 75° для качественного и количественного фазового анализа. Микротвердость исследовали на приборе ПМТ-3 путем вдавливания в испытуемый образец четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° при нагрузке 100 г (0,98 Н) (ГОСТ 9450 – 76). Интенсивность изнашивания измерялась для трех видов оплавленных лазером покрытий: без легирования, легированных В<sub>AM</sub> и В<sub>4</sub>С. Покрытия оплавлены на скоростях от 100 до 1500 мм/мин. Нагрузка составила 11,17 Н, время испытания 10 мин. Использовано по пять образцов для каждого вида покрытий.

Результаты определения фазового состава нержавеющей проволоки AISI 316Lsi в состоянии поставки отображены на рисунке 1.



Рисунок 1– Диаграмма распределения количества легирующих элементов сварочной нержавеющей проволоки AISI 316Lsi .

Рентгеновский фазовый анализ покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi без лазерного легирования и с легированием  $V_4C$  представлен на рисунке 2, 3.

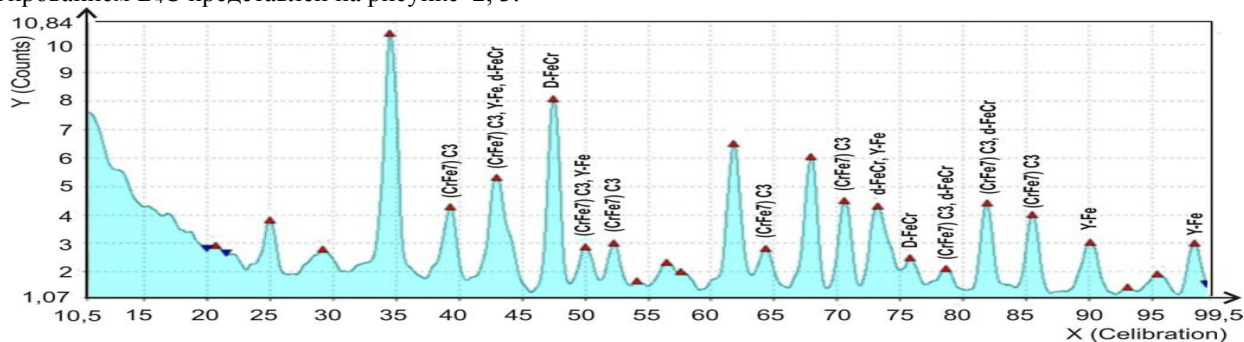


Рисунок 2 – Результаты фазового анализа напыленного покрытия AISI 316Lsi без лазерного легирования

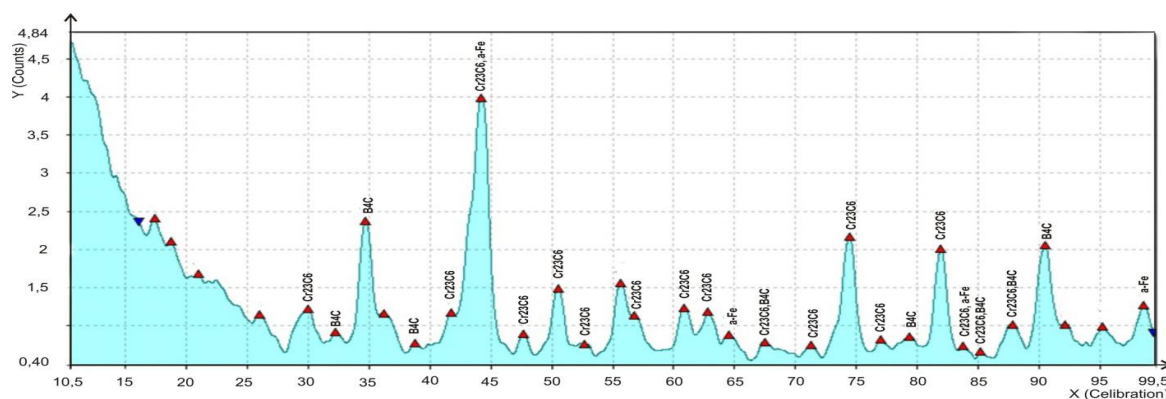


Рисунок 3– Легированного покрытия  $V_4C$  на основе из нержавеющей стали AISI 316Lsi

Полученные результаты показывают, что основной фазовый состав напыленного слоя (рисунок 2) составляет  $\gamma$ -Fe (аустенит),  $\delta$ -FeCr и карбиды  $(CrFe_7)C_3$ . Можно предположить, что при гиперзвуковой металлизации происходит выгорание и окисление в виде черных прослоек (на рисунке 4 выделено стрелками).

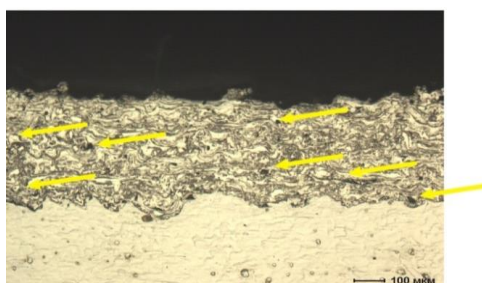


Рисунок 4 – Напыленный слой AISI 316Lsi без легирования

После лазерной обработки состав легированного слоя меняется и состоит из  $\alpha$ -Fe, карбидов хрома  $Cr_{23}C_6$  и исходных карбидов бора  $B_4C$ . Это видно из расшифровки спектра 1 на рисунке 3. При легировании произошел переход  $\gamma$ -Fe в  $\alpha$ -Fe. Мартенситная структура способствует повышению твердости легированного слоя. Остаточные карбиды  $V_4C$  напыленного покрытия при нагреве в процессе лазерного легирования распадаются, и C вступает с Cr во взаимодействие и переходят в  $Cr_{23}C_6$ . При такой технологии получения покрытия в процессе

легирования идет упрочнение покрытия за счет Cr и  $\alpha$ -железа – происходит модифицирование поверхностного слоя. При этом кристаллическая решетка переходит из  $\gamma$ -Fe (аустенит) в  $\alpha$ -Fe (мартенсит). Прослеживается четкая зависимость микротвердости покрытий от скорости ее обработки – с увеличением скорости микротвердость повышается. В процессе лазерного легирования карбидом бора наибольшая микротвердость 6810 МПа достигается при скорости детали относительно луча лазера  $V = 1500$  мм/мин и диаметре лазерного пятна 1,0 мм, а наименьшая – 3474 МПа при скорости луча лазера  $V = 100$  мм/мин и диаметре луча лазера 1 мм. При легировании аморфным бором покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi микротвердость варьируется от 5029 МПа при  $V = 1500$  мм/мин и диаметре лазерного пятна 1,0 мм и до 4327 МПа при скорости луча лазера  $V = 100$  мм/мин и диаметре луча лазера 1 мм. В покрытиях без легирования получена та же зависимость – наибольшая микротвердость 4327 МПа при  $V = 1500$ , диаметре лазерного пятна 1,0 мм, наименьшая 2434 МПа при  $V = 100$  мм/мин. Интенсивность изнашивания измерялась для трех видов оплавленных лазером покрытий: без легирования, легированных  $V_{AM}$  и  $V_{4C}$ .

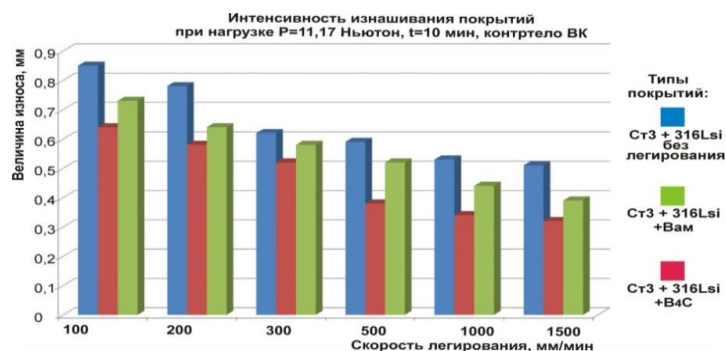


Рисунок 5 – Интенсивность изнашивания покрытий

Как видно из представленного рисунка 5 наименее износостойкими являются покрытия без легирования, а наиболее износостойкими являются покрытия после лазерного легирования  $V_{4C}$ . В покрытиях после лазерного легирования  $V_{4C}$  происходит дополнительное образование упрочняющей фазы, состоящей из  $Cr_{23}C_6$ , которая получается вследствие того, что в процессе обработки часть карбида бора распадается и углерод вступает во взаимодействие с хромом. Кроме того, в покрытиях имеется часть непрореагировавших частиц  $V_{4C}$ . Это повышает твердость, а, следовательно, и износостойкость получаемых покрытий. При легировании аморфным бором образуются только бориды железа и хрома, т. е. количество упрочняющей фазы меньше и покрытие изнашивается быстрее. В покрытиях без легирования содержится минимальное количество упрочняющей фазы и это отрицательно влияет на их износостойкость. Данная тенденция справедлива для всех скоростей лазерной обработки покрытий.

**Заключение.** При лазерном оплавлении имеются остаточные карбиды бора и углерод, который при распаде  $V_{4C}$  взаимодействует с имеющимся в напыленном слое хромом и образует  $Cr_{23}C_6$ . Данное соединение является упрочняющей фазой, которая благотворно влияет на повышение износостойкости покрытий из нержавеющей стали. При лазерной химико-термической обработке нержавеющей стали получено, что дополнительное легирование  $V_{4C}$  и  $V_{AM}$  приводит к повышению микротвердости и износостойкости. С увеличением скорости лазерной и обработки четко прослеживается уменьшение интенсивности изнашивания получаемых покрытий. По всей вероятности происходит образование пересыщенного твердого раствора на основе железа с вкраплениями карбидов и боридов в виде квазиэвтектики. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что модифицированные покрытия из нержавеющей стали AISI 316Lsi можно использовать в деталях нефтяного оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Девойно, О.Г. Исследование износостойких покрытий диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О.Г. Девойно, А.Ф. Пантелеенко – Наука и техника, Т. 16, № 3 – 2017, С. 249 – 255.
2. Кинетика уплотнения плазменно наплавленного порошка системы Fe–Cr–B–Si оплавленного лазерным лучом / Т.М. Абрамович Н.Н. Дорожкин, О.В. Дьяченко, М.А. Кардаполова, С.А. Донских, Ю.А. Симонов // Математические модели физических процессов и их свойства: сб. науч. тр. 9-й межд. науч.-техн. конф., Таганрог, 27-28 июня 2003. – С. 130–132.
3. Кардаполова, М.А. Оптимизация трибологических характеристик покрытий на железной основе после лазерного модифицирования / М.А. Кардаполова, О.В. Дьяченко, Е.Э. Фельдштейн // Машиностроение и техносфера XXI века: XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк, 2006.– т. 2 – С. 104–107.
4. Катаев, В. А. Методы исследования фазового состава и свойств углеродистой стали / В. А. Катаев ; науч. ред. в. о. Васильковский ; М-во образования и науки рос. Федерации, урал. федер. ун-т. – Екатеринбург :Изд –во Урал. ун-та, 2016. – 84 с.

5. Ziętała M. et al. The microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316 L stainless steel fabricated using laser engineered net shaping //Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Т. 677. – С. 1-10.

6. Власов, В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей / В.М. Власов – М.: Машиностроение.–1987. – 304 с.

УДК 621.835-41:514.764

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ШАГАЮЩИХ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ПО ЗАДАННОМУ ЗАКОНУ КРИВИЗНЫ

*В.Н. Жуковец, ФММП БНТУ, г. Минск*

*Резюме - представлено теоретическое обоснование различных математических методов расчета плоских кривых по заданному закону кривизны. Разрабатываемые методы могут быть применены в системах автоматизированного проектирования, когда необходимо построить криволинейную цилиндрическую поверхность детали. Полученная форма рабочей поверхности детали позволит повысить её долговечность и улучшить эффективность работы колесно-шагающей ходовой системы в целом.*

*Ключевые слова: профиль поверхности, дифференциальная геометрия, кривизна плоских линий, дифференциальные уравнения, колесно-шагающий движитель, автоматизированное проектирование*

**Введение.** При проектировании деталей и узлов машин различного назначения часто возникает проблема обеспечения контактной прочности соприкасающихся поверхностей. Кроме выбора материалов, внимание следует также уделять геометрическим параметрам деталей, в частности, кривизне профилей контактирующих криволинейных цилиндрических поверхностей. Также, от кривизны поверхности конкретной детали зависят кинематические и динамические характеристики машинного агрегата в целом.

**Основная часть.** В процессе проектирования деталей машин, совершающих вращательное движение, требуется описание различных конструктивных параметров в полярных координатах. Общеизвестно [1], что кривизна плоской линии в полярных координатах определяется согласно формуле:

$$K(\varphi) = \frac{\left| \rho^2 + 2 \cdot \left( \frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 - \rho \cdot \frac{d^2\rho}{d\varphi^2} \right|}{\left( \rho^2 + \left( \frac{d\rho}{d\varphi} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (1)$$

Если требуется найти выражение для построения линии  $\rho(\varphi)$ , используя заданную функцию кривизны  $K(\varphi)$ , то поиск решения уравнения (1) в этом виде затруднителен. Задача может быть решена, если применить метод представления кривых, изложенный в публикации [2]. В этой работе были получены выражения:

$$\begin{cases} \frac{dH}{d\varphi} = H \cdot \operatorname{tg} \gamma; \\ R = \frac{H}{\left( 1 - \frac{d\gamma}{d\varphi} \right) \cdot \cos \gamma} - r. \end{cases} \quad (2)$$

В системе (2):  $H(\varphi)$  – расстояние между осями вращения кулачка и ролика, мм;  $\gamma(\varphi)$  – угол давления кулачка на ролик, радианы;  $R(\varphi)$  – радиус кривизны профиля кулачка, мм;  $r$  – радиус ролика, мм;  $\varphi$  – угол поворота кулачкового вала, радианы.

Принимаем обозначение:  $K = \frac{1}{R+r}$  – кривизна линии, описываемой осью ролика при его относительном движении вокруг профиля кулачка, 1/мм. При этом  $K = f(\varphi)$ ,  $H(\varphi) = \rho(\varphi)$ .

После выполнения преобразований выражений (2), получим систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{d\varphi} = \rho \cdot \operatorname{tg} \gamma; \\ \frac{d\gamma}{d\varphi} = 1 - \frac{\rho \cdot K}{\cos \gamma}. \end{cases} \quad (3)$$

Следует отметить, что данные уравнения (3) имеют большое прикладное значение при решении широкого круга вопросов проектирования. Помимо построения кулачкового профиля для механизмов различного