

УДК 621.78

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЧУГУННЫХ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ НАНОПОКРЫТИЙ И ТОНКИХ ПЛЕНОК

Мальцев Т.В. – аспирант

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства  
имени Петра Василенка)*

*Рассмотрены методы и особенности упрочнения чугунных поршневых колец. Показана перспективность применения ионно-плазменной технологии нанесения нанопокровтий и тонких пленок, для повышения их эксплуатационных характеристик.*

**Вступление.** Поршневые кольца функционируют в экстремальных условиях высоких температур, трения при возвратно-поступательном движении, высокой термомеханической напряженности, работе при масляном голодании и преобладающем абразивном виде изнашивания. Практика показывает, что такие условия снижают ресурс серийно выпускаемых колец, особенно изготавливаемых из серого чугуна. Поэтому, для обеспечения высокой долговечности поршневых колец в производстве применяют достаточно эффективные методы упрочнения, например гальваническое хромирование или лазерная закалка. Однако, из-за особенностей конструкции, размеров, материала изготовления поршневых колец, из-за особенностей применения вышеупомянутых технологий упрочнения, можно не обеспечить достаточно высокой долговечности. В частности, это касается маслосъемных поршневых колец дизель-генератора модели Д100, которые по серийной технологии изготавливают из серого чугуна без последующего упрочнения рабочей поверхности.

**Целью данной работы** является анализ наиболее распространенных методов упрочнения поршневых колец и оценка возможности применения высокоэффективных ионно-плазменных технологий нанесения наноразмерных покровтий и тонких пленок.

Снижение износа поршневого кольца, особенно первого, находящегося в наиболее тяжелом положении, достигается путем нанесения на рабочую поверхность прочного износоустойчивого слоя хрома [1]. Хромовое покровтие обладает рядом достоинств:

- высокая твердость;
- хромовое покровтие существенно уменьшает износ вследствие трения;
- высокая температура плавления хрома – 1920°C, что на 650°C выше температуры плавления серого чугуна и на 180°C выше температуры

плавлення стали. Это определяет низкую склонность хромового покрытия к спеканию и заеданию;

- малый коэффициент трения хрома по чугуна и стали, что снижает потери на трение при отсутствии слоя смазки;
- высокую коррозионную стойкость покрытия.

Однако наряду с достоинствами такому покрытию присущи недостатки:

- длительная приработка;
- низкая теплостойкость;
- плохо удерживает на своей поверхности масло.

Обычная технология нанесения хромового покрытия на кольца позволяет наносить слой толщиной 0,15-0,25 мм для двигателей с диаметром цилиндра 150–350 мм, максимальная толщина покрытия может быть 0,5 мм. Хромовый слой имеет высокие внутренние напряжения, которые возрастают с увеличением толщины покрытия. При определенных обстоятельствах микротрещины превращаются в макротрещины. Толщина такого слоя не достаточна для обеспечения высокого ресурса работы изделия. Предприняты попытки в разработке технологии, которая обеспечивает нанесение слоя без сколов покрытия большой толщины. Таким примером является разработка фирмой «Гетце» так называемого хромового покрытия типа «Sandwich», которое имеет толщину слоя около 1 мм. Этим достигается необходимый запас по износу, который обеспечивает ресурс кольца. При этом способе, в результате послойного хромирования различными вариантами хромовых слоев, макротрещины в покрытии не формируются. Обычно в двигателях применяют только первые компрессионные кольца с хромовым покрытием. Иногда в дизельных высокооборотных двигателях устанавливают несколько хромированных колец, в том числе и скребков маслоъемных колец. Применение первого хромированного кольца уменьшает износ рабочей поверхности цилиндра на 50% и износ кольца на 30% по сравнению с исходными.

**Пористое хромирование.** При этом способе кольцо сначала покрывается сплошным слоем твердого хрома; нанесенный слой хрома дополнительно разрыхляется во внешней зоне обычно на одну четверть толщины всего слоя и, тем самым, обеспечивается пористость и способность удерживать масло. Преимущество слоев пористого хрома состоит в следующем: разрыхленная, пористая, рубцеватая или шероховатая внешняя зона в эксплуатации сравнительно быстро истирается в местах высокого удельного давления; однако заеданию препятствует скопившееся в порах смазочное масло. При правильно выбранной пористости мелкие, но твердые продукты истирания, вместе со смазочным маслом, находящимся в порах, образуют «полировальный» материал, который способствует быстрой притирке кольца в цилиндре. После периода приработки пористый слой снимается, и плотный слой твердого хрома, лежащий под пористым, препятствует дальнейшему прогрессивному увеличению износа. При этом способе хромирования не предъявляются повышенные требования к точности выполнения кольца; распределение радиальных давлений и плотность

прилегания. Применение пористохромированных колец целесообразно в том случае, если они должны быстро приработаться к неточной форме цилиндра. При недостаточной смазке колец этот способ также может обладать преимуществами. С другой стороны, создание пористости внешнего слоя хрома, во время эксплуатации способствует образованию крупных частичек, которые, попав между поверхностями скольжения приводят к повреждениям.

**Твердое хромирование.** Его выполняют при обработке поршневых колец, создавая слой твердого хрома цельным, ненарушенным. Кольца, предназначенные для такого хромирования, подвергают на рабочей поверхности либо грубой обточке, либо чистовой и гладкой обработке или же шлифуются для обеспечения ускоренной приработки. Если рабочую поверхность кольца не обработать, во время приработки, которая длится примерно в 3-5 раз дольше, расход масла превышает регламентированный на 30-300%.

**Мгновенное хромирование.** При этом способе кольца, без особой точности изготовления, покрываются тонким слоем твердого хрома толщиной 0,02-0,03 мм. Прирабатываемость колец остается длительной; вследствие меньшей точности, нельзя избежать высокой утечки газов, связанной с увеличенным расходом масла. Для такого хромирования более всего пригодны цилиндрические или конические кольца с прямым или косым замком. Усложненные профили колец или замков затрудняют работы по хромированию и делают их значительно дороже. Пазы для стопорных штифтов, которые прорезают также и рабочую поверхность кольца, лучше всего вырезать на шлифовальном станке после хромирования колец. Для клинообразных колец расточка или шлифование торцовых поверхностей на конус также производится лишь после хромирования. Высококачественное хромирование кольца можно получить в том случае, если в процессе нанесения сжаты в правильную форму круга и слой хрома наносится по контуру равномерно. Потому, что внутри слоя хрома возникают значительные напряжения, которые делают невозможным последующее сжатие колец в правильную круглую форму, если это сжатие не произвести в процессе хромирования. Кольца даже с незначительными различимыми пороками материала на поверхностях, которые должны покрыться хромом, должны браковаться. После хромирования водород, поглощенный в ходе процесса и делающий кольца хрупкими и ломкими, должен быть удален; это осуществляется многочасовым кипячением в воде, масле или нагреванием до 180° на воздухе.

Хромирование поршневых колец в настоящее время представляет собой еще не вполне решенную проблему, хотя сейчас уже и имеются хромированные кольца высокого качества. Применение твердого хромирования для упрочнения в настоящее время составляет 15 – 20% от всего производства колец.

Твердое хромовое покрытие должно обладать высокими свойствами. Слой хрома должен прочно сцепляться с основным материалом кольца. Прочность сцепления должна превышать прочность на сдвиг внутри слоя хрома, так как отделившиеся частицы слоя, попадающие между трущимися поверхностями,

могут вызвать разрушительные последствия. Сцепление слоя хрома не должно нарушаться коррозией, возникающей под покрытием. Кроме того, хромовое покрытие должно удовлетворять следующим требованиям:

- высокая равномерная твердость HV 950- 1100;
- равномерная толщина по всему контуру, в том числе на концах кольца; плавный переход к другим толщинам на кромках – фасках или закруглениях;
- сплошная плотность слоя; отсутствие газовых пор и посторонних включений.

Стали являются более подходящим материалом для хромирования, чем серый чугун, и в обоих случаях нелегированные материалы более, чем легированные. Из сортов серого чугуна с меньшей долей графита и плотные лучше поддаются хромированию, чем насыщенные графитом и рыхлые. Поры, рыхлые места и большие графитные гнезда могут вызвать значительные затруднения при твердом хромировании.

Также, наряду с гальваническим хромированием в достаточной мере эффективным методом является и лазерная закалка рабочей поверхности поршневых колец [2, 3].

Для проведения исследований [2] использовали кольца производства ОАО «КЗПК», ОАО «ЯМЗ» и, изготавливаемые ОАО «РУМО».

Лазерную закалку колец осуществляли по двум вариантам на разных установках. Первый, включает в себя твердотельный лазер ЛТН-103, обладающий мощностью до 500 Вт, и станок с ЧПУ ТПК-125ВН, применение которого позволяет регулировать скорость лазерного луча (V) от 1 до 12 мм/с. Второй вариант обработки включал CO<sub>2</sub> – лазер непрерывного действия мощностью 1 700 Вт, скорость перемещения луча лазера до 110 мм/с. Для более качественного поглощения энергии лазерного излучения рабочие поверхности подвергали специальной подготовке.

При лазерной обработке деталей, изготовленных из высокопрочного чугуна, в поверхностных слоях образуется структура белого чугуна. Известно, что по сравнению с серым чугуном белый обладает значительной твердостью и износостойкостью, т. к. графит отсутствует, а находящийся в нем углерод представлен в виде карбидов (с компонентами Fe, Cr, W и др.).

Наряду с традиционными способами упрочнения, лазерная обработка трущихся поверхностей деталей машин позволяет формировать структуру чугуна с дифференцированными физико-механическими свойствами.

Структура белого чугуна имеет карбиды типа Fe<sub>3</sub>C или (Fe, Cr)<sub>3</sub>C в перлитной матрице. Этот чугун обладает большей твердостью, повышенной хрупкостью и не поддается при обычных режимах механической обработке.

Износостойкость отбеленного чугуна, полученного лазерной обработкой, определяется механическими свойствами отдельных структурных составляющих (микротвердости, прочности, вязкости, формы, взаимного расположения и количественного соотношения). Расположение структурных составляющих

отбеленного чугуна по мере возрастания твердости: эвтектоид, аустенит, мартенсит, цементит, карбиды хрома, вольфрама и др. элементов.

Управление процессом первичной кристаллизации может способствовать получению белого чугуна с высокой износостойкостью. Образование широких и коротких дендритов аустенита является следствием малой степени переохлаждения, что также приводит к появлению грубых пластинок цементита. Образованию вытянутых тонких дендритов аустенита способствует большая степень переохлаждения, а также приводит к измельчению цементитной эвтектики.

Ускоренный рост эвтектического цементита является следствием диффузионного разделения жидкости на отдельные составляющие эвтектики при кристаллизации. Расширение области кристаллизации эвтектики увеличивается с величиной переохлаждения, т. к. скорость роста цементита превышает скорость роста эвтектического аустенита.

Существенное влияние на дисперсность цементитной эвтектики оказывает степень переохлаждения расплава. Концентрация углерода в аустените при увеличении скорости охлаждения металла достаточно сильно отличается от равновесного состояния. Это приводит к изменению соотношения между количеством дендритов аустенита и цементитной эвтектики. При низких скоростях охлаждения количество эвтектики уменьшается.

Вторичная кристаллизация аустенита в условиях переохлаждения сопровождается образованием эвтектоида с меньшим содержанием углерода и пониженной микротвердостью. Распад аустенита должен приводить к образованию тростомартенситных, мартенситных или мартенситноаустенитных структур, обеспечивающих повышение износостойкости.

При лазерной обработке высокопрочного чугуна Si увеличивает верхнюю критическую скорость отбеливания. Под влиянием кремния (0,5–1,5 %) предел растворимости углерода в аустените и положение эвтектической точки на диаграмме «Fe – C – Si» смещается влево, причём строение карбидной эвтектической составляющей становится более тонким. Это связано с увеличением объёмов жидкой фазы, остающейся в расплаве к моменту эвтектического превращения.

Структурные изменения в твёрдом состоянии зависят от содержания Si в зоне лазерной обработки. Установлено, что при обычных скоростях охлаждения чугуна кремний практически целиком концентрируется в ферритной основе. Повышение сопротивления изнашиванию и твёрдости образцов является следствием повышения концентрации Si в доэвтектических белых чугунах до 0,78 % (рис. 1).

Кремний способствует увеличению количества цементитной эвтектики и уменьшению содержания аустенита. При малом содержании кремния (до 1 %) в чугунах в зоне обработки наблюдается значительная степень переохлаждения эвтектического расплава и образование обособленных цементитных зерен. Формирование эвтектики мелкозернистого строения осуществляется, несмотря на уменьшение степени переохлаждения чугуна, связанного с увеличением

содержания Si. В связи с уменьшением содержания углерода в аустените в бывших дендритах избыточного аустенита нет игл вторичного цементита. Укрупнение пластинок эвтектоида отмечено при содержании более 1,2 % кремния, при этом хорошо выделен пластинчатый эвтектоид.

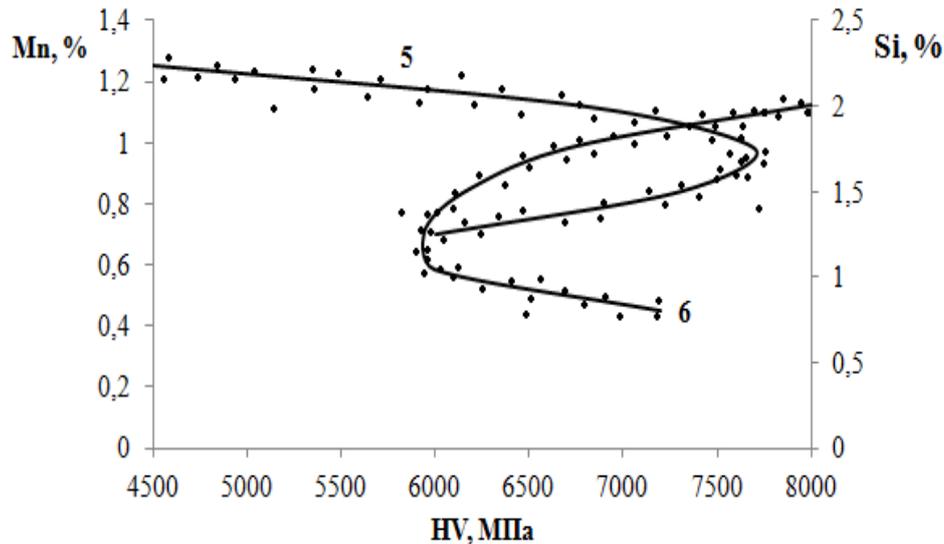


Рис. 1 - Влияние химических элементов на микротвердость зоны лазерной обработки поршневых колец: 5 –  $HV = f(Mn)$ ; 6 –  $HV = f(Si)$

В высокопрочных чугунах следует поддерживать содержание Si в интервале 0,8...1,2 %, принимая во внимание повышения жидкотекучести. При увеличении кремния более 1,2 % износостойкость чугуна, обработанного лазером, уменьшается.

В белом чугуне марганец стабилизирует цементит и аустенит. Исследованиями распределения Mn, Cr, Mo и V в белом чугуне при количестве каждого элемента до одного процента и содержании углерода до 3,5 % было установлено, что концентрация данных элементов минимальна в середине зоны оплавления, постепенно повышается к периферии. Это наиболее заметно, когда содержание углерода низкое ( $C < 2,3$  %). С увеличением содержания C пропорционально снижается степень концентрации этих элементов.

С повышением концентрации Mn до 1,3 % наблюдается перераспределение углерода между расплавом эвтектики и аустенитом в направлении увеличения содержания углерода в аустените. При концентрации Mn до 1 % эвтектоид имеет характерное карбидное строение. Цементитные структуры существенно не изменяются при увеличении концентрации марганца. Можно отметить небольшую склонность к образованию сплошных цементитных полей. При концентрации марганца до 1,5 % износостойкость чугуна изменяется незначительно.

Хром способствует сильному отбеливанию чугуна. Он уменьшает растворимость углерода в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе, увеличивает количество эвтектики и степень устойчивости твёрдого раствора. Установлено, что при небольшой концентрации хрома в чугуне образуется карбидная фаза (рис. 2).

В белых чугунах с содержанием до 0,4 % хрома отношение его содержания в карбидах к концентрации его в феррите меняется незначительно и составляет 5:1. При увеличении содержания Cr более 0,4 %, износостойкость уменьшается. Это объясняется растворением хрома в цементите, что приводит к его охрупчиванию.

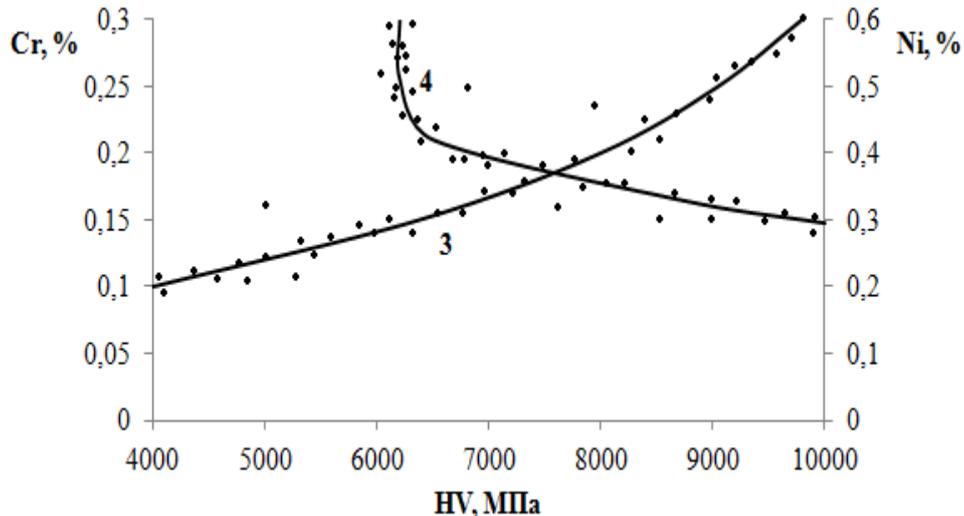


Рис. 2 – Влияние химических элементов на микротвердость зоны лазерной обработки поршневых колец: 3 –  $HV = f(Cr)$ ; 4 –  $HV = f(Ni)$

При кристаллизации железоуглеродистых сплавов, содержащих титан, последний выделяется в расплаве в виде карбида TiC, не растворяясь в цементите. Вследствие образования карбида титана жидкая фаза обедняется углеродом и при достаточном количестве титана и соответствующих условий охлаждения вызывает отбеливание чугуна. При содержании в чугуне до 0,13 % Ti эвтектоидная точка S смещается вправо, уменьшая количество перлита и увеличивая содержание углерода. Значительный интерес представляет способность титана переохлаждать расплавленный чугун при лазерной обработке. Это свидетельствует о растворимости карбида титана в чугунном расплаве и выделении карбида во время кристаллизации.

С увеличением титана до 0,2 % улучшаются механические свойства чугуна. Это объясняется образованием эвтектоида с достаточно высокой твердостью и увеличением размеров его полей, уменьшением количества цементитной эвтектики и снижением микротвердости цементита. Совокупность этих факторов приводит к увеличению вязкости чугуна и уменьшению в процессе износа выкрашивания цементитной эвтектики и структурно-свободного цементита.

При наличии ванадия происходит стабилизация цементита, причём тем сильнее, чем выше его содержание в чугуне. В высокопрочном чугуне может раствориться до 0,5 % ванадия. Следовательно, легирование данным элементом приводит к обеднению углеродом и связыванию части углерода в карбиды жидкой фазы. Из-за появления специальных карбидов VC, VC<sub>2</sub>, по сравнению с цементитом более устойчивых, карбидообразование цементита осложнено.

При легировании чугуна ванадием обеспечивается более высокая твёрдость и износостойкость, по сравнению с чугуном, содержащим 0,4 % хрома.

Никель образует с углеродом метастабильное соединение  $Ni_3C$ . Легирование чугуна никелем способствует стабилизации аустенита и расширяет область  $\gamma$ -железа. Исследованиями определено, что никель так же как марганец влияет на твёрдость белого чугуна.

При содержании Ni до 1 % наблюдается дендритное строение чугуна, достаточно объёмные поля трооститообразного эвтектоида с включениями вторичного цементита, небольших участков свободного цементита и эвтектика тонкого строения. Повышения износостойкости при такой концентрации Ni не происходит.

Наиболее сильное влияние на повышение износостойкости чугунов оказывает Mo, который образует твёрдые растворы с железом. Присутствие молибдена приводит к увеличению количества полей трооститообразного эвтектоида с включениями вторичного цементита. При содержании около 1,5 % Mo в высокопрочном чугуне после лазерной обработке значительно повышается износостойкость поверхностей трения.

Сера – одна из вредных примесей. Она образует с железом соединения FeS и  $FeS_2$ . Сера делает чугун густотекучим, увеличивает усадку, приводит к появлению трещин, негативно действует на физико-механические свойства, но при этом содействует отбеливанию чугуна.

При содержании S до 0,12 % наблюдается крупнопластинчатый эвтектоид со значительным количеством вторичного цементита крупноигльчатого дендритного строения. Междендритное пространство заполнено свободным цементитом, в котором расположены включения марганца кубической и многогранной формы. Имеется незначительное количество эвтектики тонкого строения. Содержание серы в высокопрочном чугуне должно быть не более 0,1 %.

Влияние фосфора на физико-механические свойства рассматривалось при его содержании до 0,15 %. В соответствии с диаграммой состояния «Fe – P» повышение содержания P в значительной степени понижает температуру плавления металла. Фосфид  $Fe_3P$  и насыщенные кристаллы  $\alpha$ -раствора образуют эвтектику. Фосфидная эвтектика обладает высокой твёрдостью.

Характер распределения фосфидной эвтектики в чугунах оказывает двойственное влияние на его износостойкость. При расположении фосфидной эвтектики в виде сетки увеличивается износостойкость чугуна. Однако, отдельные включения фосфидной эвтектики сравнительно легко выкрашиваются и отрицательно влияют на износостойкость. Поэтому в высокопрочных чугунах, упрочняемых лазером, должно быть минимальное количество фосфора.

Наиболее целесообразно рассматривать вышеперечисленные элементы в комплексе, чтобы учитывать их взаимное влияние.

Проводились исследования влияния комплексных присадок на структуру и свойства отбеленного белого чугуна.

При рассмотрении системы «кремний – марганец – хром» изменялось содержание марганца от 0,7 до 1,4 %, при неизменном содержании кремния 0,9...1,1 % и хрома 0,2...0,4 %.

При наличии 0,7 % Mn дендритное строение наблюдается не на всех участках шлифа; эвтектоид трооститообразный, большое количество свободного цементита, при этом наблюдается отсутствие вторичного цементита. С увеличением содержания марганца до 1,4 %, формируется дендритное строение и происходит некоторое увеличение эвтектики. Повышенное содержание марганца увеличивает микротвердость и износостойкость деталей.

Исследована система элементов «С – Si – Mn – Cr – Ti». Содержание углерода изменялось в пределах от 2,9...3,5 %, содержание остальных элементов оставалось постоянным (рис. 3).

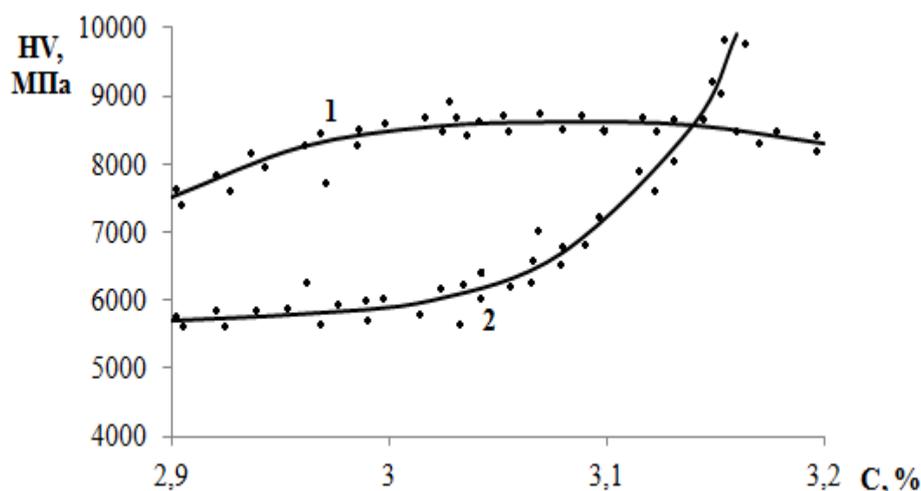


Рис. 3 – Влияние химических элементов на микротвердость зоны лазерной обработки поршневых колец: 1 –  $HV = f(C)$  на глубине 0,07 мм; 2 –  $HV = f(C)$  на глубине 0,1 мм

При содержании до 3 % углерода наблюдалось тонкое дендритное строение: эвтектоид – сорбитообразный, много мелких полей свободного цементита. Эвтектика тонкого строения, её количество увеличено. Карбиды титана расположены в полях цементита и эвтектики, при этом наблюдается отсутствие вторичного цементита.

При дальнейшем увеличении концентрации С растет количество эвтектики. При этом она располагается в виде колоний более грубого строения. Максимальная износостойкость достигается при содержании 3,32 % углерода.

В системе «кремний – марганец – хром – фосфор» рассматривали влияние содержания фосфора в пределах от 0,1 до 0,14 % на свойства чугуна (2,8...3 % С, 1,1... 1,6 % Si, 0,2...0,3 % Cr).

При содержании фосфора 0,1 % наблюдалось дендритное строение, значительное количество эвтектоида трооститообразного и тонкопластинчатого строения. Пространство между дендритами занято свободным цементитом. Эвтектика в структуре отсутствовала. Повышение содержания фосфора

способствует некоторому снижению микротвердости. Введением фосфора в сочетании с любыми другими элементами трудно получить чугун с повышенной износостойкостью, т. к. это приводит к уменьшению эвтектоида и росту хрупких составляющих (цементита и фосфидной эвтектики).

Для лазерной закалки компрессионных колец и получения требуемых физико-механических свойств, слоям лазерного воздействия предпочтительно применять высокопрочные чугуны с шаровидным графитом, имеющие следующий химический состав: С (3,0... 3,2) %, Мп (0,8... 0,95) %, Cr (0,2...0,3) %, Ni > 0,8 %, Si (1,75... 2,2) %, P < 0,5 %, S < 0,09 %.

В дополнение к работе [2], были выполнены исследования этими же авторами по лазерной закалке [3], в ходе которых установлено, что микротвердость при лазерной обработке чугунов деталей цилиндропоршневой группы возрастает более чем в 4 раза по сравнению с исходной. Изменение микротвердости по глубине зоны лазерного воздействия непосредственно зависит от мощности лазерного излучения и скорости перемещения лазерного луча относительно обрабатываемой поверхности детали.

Максимальное значение микротвёрдости при обработке чугунов CO<sub>2</sub>-лазером «Комета-2» при  $P = (500...700)$  Вт и  $V = (2...5)$  мм/с достигает HV 900 МПа, а с использованием лазера ЛТН-103 при  $P = (250...600)$  Вт и  $V = (1...6)$  мм/с – HV 800 МПа. Для структур, полученных при этих режимах, характерны минимальные диаметры дендритных осей и наименьшие расстояния между ними.

Твёрдость поверхностных и подповерхностных слоев зоны оплавления при увеличении содержания углерода от 2,9 до 3,2 % изменяется незначительно. На глубине  $l > 0,07$  мм, с увеличением содержания углерода, твёрдость слоев возрастает. Существенное влияние на увеличение твёрдости оказывает содержание в чугуне хрома. Его воздействие на твёрдость HV также связано с увеличением содержания углерода. Это можно объяснить образованием в зоне лазерного воздействия карбидов хрома. Марганец, наоборот, способствует уменьшению твёрдости слоев зоны лазерного воздействия при его содержании в чугуне более 0,9 %. Изменение количества кремния в составе чугуна на твёрдость зоны лазерного воздействия оказывает меньшее влияние.

По результатам исследований характера распределения микротвердости по глубине упрочнённого слоя чугунов поршневых колец, с увеличением скорости лазерной обработки и уменьшением мощности излучения микротвердость слоев зоны воздействия уменьшается. Однако при определённых режимах лазерной обработки чугунов поршневых колец наблюдается некоторое снижение микротвердости поверхностных и подповерхностных слоев зоны оплавления. Это объясняется тем, что при данных режимах обработки графит в зоне оплавления полностью растворён и происходит увеличение содержания остаточного аустенита. Количество мартенсита при этом уменьшается из-за снижения скорости охлаждения зоны оплавления, а также из-за обезуглероживания. Следует отметить, что на

распределение микротвердости по слоям и глубину зоны лазерного воздействия существенно влияет структурное состояние чугунов поршневых колец.

Наблюдаемое снижение микротвёрдости у поверхности зоны лазерного воздействия является благоприятным условием формирования износостойкой микроструктуры. Так, процесс приработки материала поршневых колец будет протекать за меньший промежуток времени. При этом уменьшается трудоёмкость операций притирки поршневых колец после лазерной обработки. Выход же в процессе эксплуатации трущейся поверхности на слои повышенной твёрдости обеспечит повышение износостойкости данных деталей. На таких режимах в зоне оплавления формируется аустенитно-мартенситная структура с тонкодисперсными включениями аустенита.

Износостойкость поршневых колец с лазерной обработкой исследовали в сравнении с хромированными кольцами судовых дизелей 6 ЧРН 36/45 на испытательном стенде при возвратно-поступательном движении. Нагрузка на контактирующие поверхности образцов составляла 1 кН, время приработки – 3 ч, суммарное время испытаний соответствовало 25, 50, 100 ч. В зону трения подавали масло М14В<sub>2</sub> – 6 капель в минуту при скорости скольжения образцов 1,3 м/с. Температура рабочей зоны трения образцов контролировали термодарами и составляла 90 °С.

По результатам исследований установлено, что лазерная обработка поршневых колец не только повышает износостойкость, но и снижает износ серийных втулок цилиндра. Это дополнительно подтверждает, что на рабочей поверхности поршневых колец чередование износостойких лазерных дорожек, имеющих структуру отбелённого чугуна повышенной твёрдости, и областей чугуна с графитными включениями благоприятно сказывается на работоспособности пары трения втулка цилиндра – поршневое кольцо.

Одним из существенных недостатков лазерного нагрева – значительные потери электроэнергии вследствие отражений лазерного луча от поверхности. Металлы, имеющие гладкую, блестящую поверхность, отражают 80–96 % лазерного излучения. Поэтому, для повышения поглощающей способности возникает необходимость в нанесении специальных поглощающих покрытий в виде черной гуаши, полиграфической краски, грунтовки, черной пасты и др. [3].

Наряду с вышеперечисленными методами повышения эксплуатационной стойкости поршневых колец, высокую эффективность обеспечили и технологии ионно-плазменного напыления [4, 5]. Так, в работе [4] ионно-плазменное и лазерное упрочнение применяли для обработки поверхностей поршневых колец из высокопрочного чугуна ВЧ 50-1,5 для дизеля 6ЧН 25/34. В качестве материала, который наносили напылением на установке «Булат-3Т», был выбран молибден.

Лазерная обработка поршневых колец осуществляли пучком излучения круглой формы. Источником упрочнения служило лазерное стекло с неодимом. Размеры пучка регулировались. Перед обработкой кольца обезжиривали, при наличии ржавчины она удалялась, кроме того, поверхности колец не должны иметь вмятин, заусенцев, забоин и других повреждений. Обработку поршневых

колець виробляли на вращаючомуся пристрої. Для обробки режимів використовували образці-свідетелі, на них заміряли глибину обробки і мікротвердість. По результатам замірів виробляли корективку режимів. Лазерна обробка здійснювалась в течение 20-30 хвилин, при цьому була досягнута товщина шару 80-100 мкм, мікротвердість  $H_{\mu} = 1200$  МПа.

Сравнительные износостойкие испытания проводили на образцах поршневых колец:

- с хромированным покрытием;
- упрочнённые лазером;
- напыленные молибденом.

Испытания проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «колодка-ролик». Колодка изготавливалась из материала втулки (комплексно-легированный чугун), а ролик – из материала поршневого кольца ВЧ 50-1,5, упрочнённого соответствующим образом. Количество циклов – 500 000. Нагрузка на колодку устанавливалась равной нагрузке на первое компрессионное кольцо дизеля ЧН 25/34, температура масла, подаваемого на трущиеся поверхности, поддерживалась в диапазоне 90-110°C.

Проведенные испытания показали, что:

- наибольший износ характерен хромированным образцам поршневых колец;
- наименьший износ – для образцов с молибденовым покрытием;
- совместный износ пары трения, с молибденовым покрытием образца поршневого кольца, в 2,2-2,5 раза меньше, чем у пар, где поршневое кольцо хромированное;
- совместный износ пары трения с лазерным упрочнением в 1,6-1,8 раза меньше, чем у пар, где поршневое кольцо хромированное.

В работе [5] определяли характеристики трения и микротвердость композитных ионно-плазменных покрытий, применительно к работе поршневых колец тепловозных дизельных двигателей, а также оценка влияния их на технико-экономические характеристики, выпускаемых двигателей.

Результаты испытаний по определению коэффициентов трения ( $f_{тр}$ ) приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний исследованных покрытий

Покрытие	Значения коэффициентов трения при нагрузке Р, кН						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
TiN	0,025	0,033	0,040	0,051	0,085	0,097	0,086
TiAlN	0,020	0,023	0,028	0,034	0,040	0,057	0,086
MoN + Mo	0,020	0,23	0,032	0,038	0,049	0,060	0,065
MoCuN	0,020	0,025	0,030	0,036	0,044	0,050	0,080
Хромированное кольцо	0,120	0,105	0,093	0,92	0,096	начало задири-оборазования	-

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что использование для поршневых колец таких композитных покрытий обеспечивает более высокую задиростойкость и лучшие характеристики трения сопряжения «гильза – поршневое кольцо» по сравнению с электролитическим хромовым покрытием.

Для оценки эффективности использования различных покрытий в табл. 2 приведены средние значения коэффициентов трения ( $f_{тр}$ ) в диапазоне общих нагрузок 0,2 – 1,0 кН, характерных для условий работы компрессионных поршневых колец.

Таблица 2 – Средние значения коэффициентов трения ( $f_{тр}$ ) в диапазоне общих нагрузок 0,2 – 1,0 кН и микротвердость исследованных покрытий

Материал покрытия	Средние значения $f_{тр}$	Микротвердость, Н-50, кг/мм <sup>2</sup>	
		исходная	дорожек трения
TiN	0,054	2515	3334
TiAlN	0,029	1503	1720
MoN + Mo	0,032	1507	2335
MoCuN	0,031	2022	2212
Хромированное кольцо	0,101	1057	755

Анализ средних значений показывает, что покрытия TiAlN, MoN + Mo и MoCuN дают близкие коэффициенты трения в диапазоне 0,029 – 0,032, что более чем в три раза меньше, чем значения коэффициентов трения хромированных поршневых колец. Покрытие TiN снижает коэффициент трения примерно в два раза по сравнению с хромовым покрытием. Наиболее низкие значения коэффициентов трения в рассматриваемом диапазоне нагрузок получены при испытаниях покрытия TiAlN.

Из вышеизложенного следует, что гальваническое хромирование, по триботехническим характеристикам в частности, существенно уступает ионно-плазменной упрочняющей обработке поверхности кольца. К тому же следует отметить, что гальванические процессы нанесения покрытия отличаются низкой экологичностью. Поэтому представляет интерес использовать более эффективный и экологически безопасный метод упрочнения, а именно ионно-плазменный, который обеспечивает низкий уровень износа и коэффициент трения [3, 4], даже по сравнению с лазерной закалкой [3].

Проанализированные результаты исследований показывают, что ионно-плазменные покрытия обеспечивают повышение уровня свойств осаждаемых поверхностей. Однако, следует учитывать, что в большинстве своем покрытия на основе титана [6-16] и ряд других простых – однослойных [5, 7, 13, 17] по своим возможностям во многом исчерпали себя, и они не могут обеспечить значительного улучшения эксплуатационных характеристик. Следует также отметить, что в большинстве случаев такие покрытия не подразумевают универсальности и требуют целевого применения, для того чтобы они

обеспечили максимальную эффективность [10]. Кроме того, простые однослойные покрытия повышенной толщины не обеспечивают высокой трещиностойкости, что в последствии приводит к интенсивному разрушению нанесенного слоя [7].

**Выводы.** Представляет интерес рассмотреть возможность использования многослойных покрытий из разнородных тугоплавких материалов для обеспечения более высоких эксплуатационных характеристик, в частности триботехнических, которые могут найти широкое применение в машиностроительной отрасли. Так, рассмотренные многослойные покрытия, в частности системы CrN/TiN, демонстрируют широкий спектр высоких свойств: высокие износостойкость, адгезия между покрытием и подложкой, коррозионная стойкость, жаропрочность, трещиностойкость, относительно низкий коэффициент трения и др. Поэтому, такое покрытие можно считать достаточно универсальным для широкого диапазона применений, в т. ч. и для упрочнения чугунных поршневых колец двигателей внутреннего сгорания, которые подвержены интенсивным нагрузкам и износу во время работы.

### Список литературы:

1. Околович Г.А. Хромирование поршневых колец [Текст] / Г.А. Околович, О.С. Ларцева // Ползуновский альманах, г. Барнаул, № 4, 2003 г. – с. 118-120.
2. Казаков С.С. Лазерная закалка рабочих поверхностей поршневых компрессионных колец, изготовленных из высокопрочного чугуна [Текст] / С.С. Казаков, Ю.И. Матвеев // Вестник НГИЭИ. Процессы и машины агроинженерных систем, г. Княгинино, 2017 г. - с. 25-31.
3. Матвеев Ю.И. Особенности лазерной обработки поршневых колец судовых среднеоборотных дизелей [Текст] / Ю.И. Матвеев, С.С. Казаков // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология, г. Астрахань, № 2, 2010 г. – с. 34-38.
4. Клименко Л. П. Упрочнения деталей двигателей внутреннего сгорания методами ионно-плазменных и лазерных технологий [Текст] /Л. П. Клименко, П. Я. Ревнюк, О. Ф. Прищепов и др. // Двигатели внутреннего сгорания. Технология производства ДВС, Харьков, №2, 2014 г. – с. 82 – 84.
5. Определение триботехнических характеристик композитных ионно-плазменных покрытий для поршневых колец дизельных двигателей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nano.org.ua/Library/Moshchenok.pdf>.
6. Механические свойства наноструктурированных покрытий (Ti, Al)N и (Ti, Cr)N, полученные методом вакуумно-дугового осаждения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.pse.scpt.org.ua/rus/jornal/2\\_14/22.pdf](http://www.pse.scpt.org.ua/rus/jornal/2_14/22.pdf)

7. Инновационные технологии получения износостойких и трибоадаптируемых покрытий в индустрии наносистем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://inno-exp.ru/archive/10/innov\\_10\\_2013\\_76-81.pdf](http://inno-exp.ru/archive/10/innov_10_2013_76-81.pdf)
8. Thamocharan. J Characterization of CrN/TiN PVD Coatings on 316L Stainless Steel [Electronic version] / J. Thamocharan., R. Sarala // International Journal of ChemTech Research, Vol. 6, № 6,2014 – p. 3284-3286.
9. Dobrzański L.A. Structure and properties of gradient PVD coatings deposited on the sintered tool materials [Electronic version] / L.A. Dobrzański, L.W. Żukowska // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 44, № 2, 2011 –p. 115-139.
10. Strnad G. Latest developments in PVD coatings for tooling [Electronic version] / G. Strnad, J. Buhagiar // Scientific Bulletin of the “PetruMaior” University of TarguMures, Vol. 7, № 1, 2010 –p. 32-37.
11. Ananthakumar R., Subramanian B. Electrochemical corrosion and materials properties of reactively sputtered TiN/TiAlN multilayer coatings [Electronic version] / R. Ananthakumar, B. Subramanian // Ceramics International, Vol. 38, 2012– p. 477-485.
12. Sang Yong Lee Comparative evaluation of TiN/CrN, AlN/CrN, TiAlN/CrN multilayer films for the use of semi-solid processing of Cu alloys [Electronic version] / Sang Yong Lee, Sang Yul Lee // Solid State Phenomena, Vols. 116-117, 2006 – p. 124-127.
13. Bejarano G. G. Tribological Properties and Corrosion Resistance Enhancement of H13 Hot Work Steel by Means of CrN/TiN Multilayers [Electronic version] / G. G. Bejarano, B. M. Gomez et. al. // Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 4, № 6, 2010 –p. 51-59.
14. Формирование многослойных покрытий TiN/Mo вакуумно-дуговым методом с использованием ВЧ-разряда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/lib/777\\_2\(34\)\\_07\\_p93-96.pdf](http://www-nuclear.univer.kharkov.ua/lib/777_2(34)_07_p93-96.pdf).
15. Влияние многокомпонентных и многослойных покрытий на процессы трения износа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://pse.scpt.org.ua/en/journal/4\\_04/7.pdf](http://pse.scpt.org.ua/en/journal/4_04/7.pdf).
16. Nanometric-layered CrN/TiN thin films: mechanical strength and thermal stability [Electronic resurs]. – Access mode: <http://www3.ntu.edu.sg/ThinFilms/mae-thinfilms/Thinfilms/pdppapers/TST-424-99.pdf>
17. Polok-Rubiniac M. The properties and wear resistance of the CrN PVD coatings materials [Electronic version] / M. Polok-Rubiniac, L.A. Dobrzański, M. Adamiak // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 30, № 2, 2008 –p. 165-171.

**Анотація**

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ  
ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУННИХ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ І  
ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЗМІЦНЮЮЧИХ ІОННО-  
ПЛАЗМОВИХ НАНОПОКРИТТІВ І ТОНКИХ ПЛІВОК  
Мальцев Т.В.**

*Розглянуто методи і особливості зміцнення чавунних поршневих кілець. Показана перспективність застосування іонно-плазмової технології нанесення нанопокриттів і тонких плівок, для підвищення їх експлуатаційних характеристик.*

**Abstract**

**METHODS OF INCREASING THE OPERATING PROPERTIES OF CAST  
IRON PISTON RINGS AND PROSPECTS OF APPLICATION OF  
HARDENING PVD NANOCOATINGS AND THIN FILMS  
Maltsev T.V.**

*Methods and features of cast-iron piston rings hardening is considered. The perspective of using PVD technology for depositing nanocoatings and thin films, to improve the performance of their characteristics, is shown.*