

УДК 621.793.620.172

Б. А. ЛЯШЕНКО¹, Ю. В. ВОЛКОВ², Е. К. СОЛОВЫХ³, Л. А. ЛОПАТА¹

¹Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Украина

²Одесская национальная морская академия, Украина

³Кировоградский национальный технический университет, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ПОКРЫТИЯМИ ДИСКРЕТНОЙ СТРУКТУРЫ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ДИСКРЕТНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОКОНТАТНЫМ ПРИПЕКАНИЕМ

Восстановление валов судовых машин и механизмов (СММ) является важным резервом развития судоремонтного производства, повышения его эффективности. Разработаны технологические схемы формирования износостойких дискретных покрытий электроконтактным методом на детали типа вал. Вариант покрытий дискретной структуры повышает несущую способность покрытий. Использование восстановленных валов позволяет снизить затраты судоремонтных предприятий на запасные части, сохранить большое количество металла.

Ключевые слова: покрытия дискретной структуры, электроконтактное припекание, судовые машины и механизмы, износостойкость, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Одной из главных причин повышенного износа деталей транспортных средств судовых машин и механизмов (СММ) следует считать недостаточное применение современных методов инженерии поверхности (методов нанесения защитных покрытий и упрочнения) при их восстановлении. С помощью методов инженерии на судоремонтных предприятиях при восстановлении изношенных деталей можно:

- уменьшить потребление дорогих и дефицитных материалов;
- повысить срок службы деталей;
- повысить надежность машин и механизмов, увеличить срок их эксплуатации.

Повышение надежности и долговечности машин, механизмов, транспортных средств за счет уменьшения интенсивности изнашивания их деталей и узлов, в том числе за счет применения износостойких покрытий, представляет собой одну из основных задач в современном ремонтном производстве. Сегодня в практике обработки и упрочнения рабочих поверхностей деталей насчитывается свыше 130 технологий. Многие технологии - альтернативны. На ремонтных предприятиях преобладает традиционная наплавка с последующей механической обработкой. Технологии упрочнения и восстановления могут на порядки различаться по энергозатратам, стоимости оборудования и наносимому экологическому ущербу.

Покрытия дискретной структуры. Определение. Особенности. Свойства. Преимущества. Технологии упрочнения и восстановления путем нанесения покрытий несплошной дискретной структуры занимает особое место среди известных технологий нанесения защитных покрытий. Принцип нанесения упрочняющих покрытий дискретной структуры разработан в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины. Суть принципа - замена традици-

онного сплошного слоя на прерывистый мозаично - дискретной структуры. Этим повышается адгезионная и когезионная стойкость покрытия за счет ограничения уровня максимальных напряжений как в слое покрытия, так и в адгезионном контакте [1-3].

Дискретные покрытия (ДП), представляют собой упрочненные отдельные участки, расположенные на рабочих поверхностях с определенной сплошностью. ДП увеличивают износостойкость поверхностей трения, особенно при трибофатических нагрузках за счет эффективного использования явления структурно-энергетической приспособляемости материалов при трении, путем создания архитектуры поверхности трения, сохраняющей фрагменты разрушения вторичных структур. Наличие в поверхностном слое дискретных участков повышенной твердости, оптимальной сплошности, геометрии и глубины внедрения в поверхность устраняет концентрацию напряжений от контактных нагрузок и прерывает процесс трещинообразования, пластического деформирования, а также снижает склонность к схватыванию деталей, что существенно повышают прочность и эксплуатационную надежность пар трения [1-3].

Основным преимуществом ДП являются возможность путем изменения сплошности и размеров дискретных участков на поверхности основы, а так же подбором гаммы материалов по физико-механическим характеристикам, создавать условия регулирования температурного режима, достижения наименьшего коэффициента трения и износа, управлять и минимизировать напряженно-деформированное состояние поверхности [1-3].

Принцип дискретной структуры позволяет многократно повысить предельное состояние покрытия: контактные нагрузки - в несколько раз, критические деформации растяжения основы - до 2 порядков, долговечность - в несколько раз по сравнению со сплошным покрытием той же толщины, состава и твердости. Отличительной особенностью покрытий дискретной структуры является возможность обеспечивать необходимые эксплуатационные свойства деталей [1-3].

Особенности напряженно-деформированного состояния дискретных покрытий. Размеры и конфигурация отдельных участков покрытия устанавливаются, исходя из условия минимизации уровня напряженно - деформированного состояния при силовых и температурных воздействиях на покрытие. Предложен экспериментально - расчетный метод определения размеров дискретных покрытий, который учитывает остаточные напряжения. В практике нанесения упрочняющих покрытий сложилось мнение о положительном эффекте остаточных напряжений сжатия в покрытии, заключающемся в снижении хрупкости. При наличии в покрытии значительных остаточных напряжений сжатия в процессе нагружения системы основа - покрытие (до начала роста пластических деформаций) растрескивания покрытия не наблюдается. Предложенный метод базируется на расчете величины критического шага трещины, которая является исходной для определения параметров дискретного покрытия. Этот метод использовался ранее, но без учета остаточных напряжений в покрытии. Достоверность метода подтверждена экспериментально - прямым измерением шага трещины [1]. Испытания на растяжение стандартных образцов толщиной 1,5 мм проводили на установке FM-1000. Шаг трещин C_n измеряли с помощью оптического микроскопа МИР-12. Результаты измерений приведены на рис. 1.

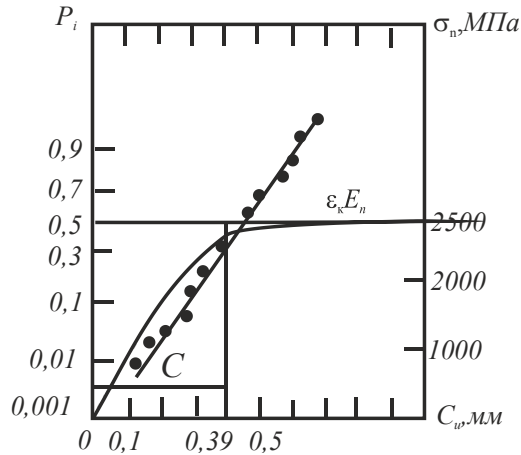


Рис.1. Расчет шага дискретного участка покрытия

Экспериментальные точки, нанесенные в координатах $P_i - C_n$ ложатся на прямую линию. Характер накопления частоты P_i дает представление о том, что распределение значений шага трещины C_n подчиняется нормальному закону. Там же показано изменение напряжений в покрытии $\sigma_n^{эф}$ по его длине, рассчитанное по зависимости

$$\sigma_n^{эф} = \sigma_n^{ост} + \sigma_n^{эксн}. \tag{1}$$

Здесь $\sigma_n^{ост}$ - остаточные напряжения в покрытии, измеренные методом гибкого образца, $\sigma_n^{эксн}$ - эксплуатационные напряжения в покрытии, возникающие под действием приложенной к образцу нагрузки и рассчитанные по зависимости

$$\sigma_n^{эксн} = \frac{\epsilon_k}{h \left(\frac{1}{hE_n} + \frac{1}{HE_0} \right)} \left[1 - \frac{ch(kz)}{ch(kl)} \right], \tag{2}$$

где ϵ_k - критическая деформация основы под действием внешней нагрузки P ; H, h - толщина основы и покрытия; E_0, E_n - модули упругости основы и покрытия; l - базовый размер;

$$k^2 = 2 \frac{\frac{G_0 G_n}{Hh}}{\frac{G_0}{H} + \frac{G_n}{h}} \left(\frac{1}{hE_n} + \frac{1}{HE_0} \right) \tag{3}$$

(G_0, G_n - модули сдвига основы и покрытия).

Как следует из рис. 1, шаг трещины C_n совпадает с характерным участком выхода зависимости $\sigma_n^{эф}$ на асимптотический уровень. Затем значение $\sigma_n^{эф}$ асимптотически приближается к $\epsilon_k E_n$. Расчетные значения шага трещин C_n определяли, предполагая, что когезионная прочность покрытия σ_f нормально распределена со стандартным отклонением $0,1\sigma_f$. Тогда трещины возникнут в сечении (1-с) при $\sigma_n^{эф} = 0,9\sigma_f$.

С учетом того, что $\sigma_f = \sigma_n^{эксн} + \sigma_n^{ост}$ при $z=0$, из соотношения

$$\frac{\sigma_n^{эксн} + \sigma_n^{ост}}{\sigma_f} = 0,9 \tag{4}$$

и зависимости (2) получим

$$1 - \frac{ch[k(l - C_n)]}{chkl} + \frac{\sigma_n^{ocm}}{\varepsilon_\kappa} \frac{1}{E_n} = 0,9. \quad (5)$$

Отсюда

$$ch[k(l - C_n)] = \left(0,1 + \frac{\sigma_n^{ocm}}{\varepsilon_\kappa} \frac{1}{E_n} \right) ch(kl). \quad (6)$$

После преобразований запишем выражение для шага трещины

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^{ocm}}{\varepsilon_\kappa} \frac{1}{E_n} \right). \quad (7)$$

Формула (7) позволяет заложить размеры дискретного участка на стадии конструирования покрытия. Кроме того, с ее помощью можно построить зависимости шага трещины от соотношения остаточных напряжений и когезионной прочности покрытия при различной толщине последнего. Таким образом, предлагаемый метод позволяет на стадии проектирования рассчитать размер дискретного участка покрытия с учетом остаточных напряжений и проанализировать влияние величины и знака остаточных напряжений на процесс когезионного растрескивания.

Формирование дискретного слоя покрытия обусловлено необходимостью снижения нормальных остаточных напряжений в покрытии и ограничения касательных напряжений в плоскости адгезионного контакта, что в условиях высоких контактных нагрузок имеет решающее значение для продления срока службы деталей [1]. ДП исключает отслаивание покрытия, резко повышают его износостойкость, так как дискретная структура покрытия ограничивает его локальное перенапряжение, которое является причиной износа традиционных покрытий. Дискретное покрытие имеет гораздо меньшие микронапряжения, чем при нанесении сплошным слоем. Покрытия на основе карбида, вольфрама, никеля, хрома увеличивают срок службы в 2,5 раза. Твердость покрытия достигает *HRC* 55...60.

Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры. Принцип покрытий дискретной структуры реализуется различными технологическими способами [1-6].

Дискретная точечная закалка позволяет избежать деформационных поворотов и финишного шлифования за счет низкой температуры обрабатываемого изделия (менее 100°C) и отсутствия закалочных сред, «сухой» и «холодный» процесс требует на порядок меньше электроэнергии в сравнении с традиционной закалкой ТВЧ.

Положительный эффект при нанесении дискретных покрытий обеспечивает применение гибких вакуумных технологий. Вакуум-плазменные технологии оказались наиболее эффективны для дискретных покрытий на металлорежущем инструменте. Они повысили долговечность твердосплавных неперетачиваемых режущих пластин более, чем в 3 раза при одновременном повышении чистоты обрабатываемой поверхности в 2 раза по сравнению с таким же сплошным покрытием.

Дискретная природа лазерного упрочнения позволяет обрабатывать дискретными участками лишь 12...18% поверхности. С увеличением сплошности покрытия свыше 12...18% вплоть до 100% не повышается износостойкость при лазерном упрочнении. Учет этого обстоятельства приведет к росту производительности лазерного упрочнения минимум в 3 раза при одновременном снижении затрат электроэнергии также в 3 раза. Это обстоятельство позволит также

отказаться от сложных «роботизированных» систем перемещения и сканирования лазерного луча, перейдя на один ускоренный проход в одном направлении.

Разработан ряд технологий для ионного азотирования в безводородной среде.

Покрытия дискретной структуры наносят газотермическим способом на длинномерные детали с прерывистостью структуры по линии действия максимальных напряжений, детонационно-газовым способом, а также электролитическим.

Газотермическое напыление дискретных покрытий протекторного свойства на длинномерные теплообменники повысило предельное состояние деформируемой основы более, чем в 3 раза, за счет повышения когезионной и адгезионной стойкости покрытия.

Технологически оказалось целесообразно нанести дискретное каталитическое покрытие на днище поршня. Это обстоятельство позволяет отказаться от традиционных каталитических дожигателей. Снижение термических напряжений, повышение адгезионной и когезионной стойкости дискретного покрытия позволило разместить каталитическое покрытие непосредственно в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания.

Наиболее простой в реализации нанесения дискретного покрытия способ электроискрового легирования (ЭИЛ), который дискретен по своей природе. При нанесении покрытия дискретной структуры метод ЭИЛ обладает рядом достоинств [4-6]:

- единичный электрический разряд позволяет обеспечить стабильность размеров и свойств отдельного дискретного участка покрытия;
- изменением параметров каждого отдельного разряда можно наносить дискретные участки различных размеров и, прежде всего, различной толщины. Этим обеспечивается возможность нанесения дифференциального покрытия, т.е. покрытия переменной толщины;
- изменением частоты импульсов или скорости относительного перемещения; электрода и детали можно регулировать количество дискретных участков на рабочей поверхности детали, а также сплошность покрытия;
- возможность проведения ЭИЛ и ППД одновременно в одном технологическом цикле;
- применение нескольких проходов ЭИЛ одновременно с ППД позволяет увеличивать толщину наносимого покрытия;
- компактность и портативность оборудования, низкая энергоемкость,
- возможность проведения «сухого» и «холодного» процесса (без сквозного нагрева всей детали);
- отпадает необходимость в дополнительной термообработке;
- возможность восстанавливать детали «на месте», без их демонтажа.

Нанесение дифференциальных дискретных покрытий методом ЭИЛ проводили с использованием серийного промышленного оборудования типа Элитрон-22. Для восстановления «по эпилуре износа» методом ЭИЛ применяют электродные материалы системы Fe-Ni-Mn-Cu-Al-Si. Эти материалы позволяют наносить покрытие толщиной до 1 мм за один проход.

Разработанные технологии и принципы моделирования архитектуры покрытий ДП позволяют выбирать оптимальный вариант конструкции дискретной поверхности, подобрать режимы нанесения и материалы покрытия с учетом конкретных условий пары трения.

Однако существующее технологическое обеспечение дискретных покрытий позволяют использовать их в основном для упрочнения поверхностей деталей и нанесения покрытий толщиной до 1 мм. При восстановлении и ремонте изношенных деталей, когда необходимо реставрировать детали и наращивать слои толщиной свыше 1мм с высокими прочностными характеристиками, применяемое технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры не решает поставленных задач.

Электроконтактное припекание порошковых материалов. Основные особенности и преимущества. По мнению большинства исследователей, в практике восстановления и ремонта деталей одними из наиболее гибких способов восстановления и увеличения срока службы деталей являются технологии наплавки и напыления с последующей механической обработкой. Вместе с тем повышенное тепловыделение при нанесении слоев большой толщины искажает геометрию восстанавливаемой детали, снижает ее ресурс, а наплавка покрытий больших толщин требует снятия значительных припусков при финишной механической обработке. Методы наплавки не обеспечивают сохранение исходных свойств материала покрытий, вносят существенные изменения в структуру материала упрочняемой детали. Связано это с тем, что материал покрытия нагревается до температур, превышающих его температуру плавления. При этом неизбежно выгорает часть легирующих элементов, меняется кристаллическая структура металлов, она становится крупнозернистой. Твердость полученных покрытий оказывается значительно ниже, чем у исходных порошков, снижаются физико-механические свойства покрытий, а в итоге невозможно в целом получение наиболее высоких эксплуатационных свойств упрочняемых деталей. В связи с этим применение способов упрочнения с минимально необходимым нагревом и малыми величинами припусков на финишную обработку становится задачей первостепенной важности.

Предпочтение следует отдать способам восстановления и упрочнения, предусматривающим получение покрытий в режиме спекания и припекания, т.к. в этом случае гарантируется сохранение в покрытии всего комплекса свойств, присущих исходной порошковой системе [7]. Припекание – нанесение на поверхность детали или порошковой формовки слоя металлического порошка с целью получения двухслойного материала нагреванием до температуры, обеспечивающей спекание порошкового материала и образование диффузионной связи с деталью. Электроконтактное припекание состоит в нанесении на поверхность детали слоя порошкового материала и его последующее спекание и припекание к детали при воздействии внешнего давления. Электроконтактное припекание - один из вариантов технологической операции припекания, который осуществляется под давлением при прямом пропускании электрического тока. Электроконтактное припекание можно рассматривать как альтернативу наплавке [7]. К достоинствам ЭКПП следует отнести [7]:

- минимальные тепловложения, что исключает термическое деформирование обрабатываемых деталей. Нагрев осуществляется импульсами электрического тока длительностью 0,04...0,2 с. Зона термического влияния тока на деталь, вследствие малой длительности нагрева, составляет 0,02...0,3мм, что в 6-10 раз меньше глубины распространения зоны термического влияния при наплавке;

- отсутствие необходимости в использовании защитных сред ввиду кратковременного термического воздействия на материал покрытия,

- уменьшение расхода металла в сравнении с наплавкой в 3-4 раза;

- отсутствием светового излучения и газовой выделению;
- высокая: производительность - до 0,01-0,15 м/мин;
- низкую энергоёмкость - 0,25-0,60 кВт/час/м;
- отсутствие жидкой фазы в зоне нанесения покрытия значительно расширяет технологические возможности процесса электроконтактного припекания: повышает долговечность электрода, снижает потери материала покрытия, позволяет увеличить толщину износостойкого слоя в 3...6 раз при минимальном уровне остаточных напряжений и прочности сцепления более 200 МПа. Пористость покрытий не превышает 5 %.

Высокое качество покрытий при ЭКПП обеспечивается импульсным характером процесса и такими физическими явлениями как аномальная диффузия и электропластический эффект.

Отличительной особенностью температурно-силового (электроконтактного припекания) является получение износостойких покрытий с минимальными (до 0,2 мм) припусками на последующую механическую обработку или ее исключением за счет совмещения припекания и поверхностно-пластического деформирования в одном процессе.

При ЭКПП доминирующими являются процессы, которые происходят как при горячем прессовании, так и при сварке давлением.

Отличительная особенность технологии – использование метода ускоренного электроспекания, что в значительной степени снижает себестоимость изделия, гарантирует высокое качество продукции, обеспечивает экологическую чистоту производства.

Электроконтактное припекание гарантирует сохранение в покрытии всего комплекса свойств, присущих исходной порошковой системе и позволяет получать функциональные гомогенные покрытия с прогнозируемыми свойствами из порошковых материалов разных классов. При помощи ЭКП можно наносить покрытия из порошков тугоплавких, труднодеформируемых материалов дисперсностью до 1 мм, включая гранулы. Для предотвращения схватывания между инструментом и покрытием разработаны и используются легированные электроды и электроды из специального сплава.

В целом процесс электроконтактного припекания характеризуется использованием электрического тока силой до 15...30 кА; вторичным напряжением 1...6 В; давлением до 100 МПа, временем импульса 0,04...0,2с; временем паузы 0,04...0,2с; высокими скоростями нагрева, которые могут достигать $10^3...10^4$ К/с. Следует отметить, что при электроконтактном припекании наличие оксидных пленок практически не снижает прочность сцепления соединения, т.к. пленка обладает высоким электросопротивлением и наиболее интенсивно нагревается импульсом тока с последующим ее удалением из зоны сопротивления.

Электроконтактное припекание позволяет в цепочке многооперационной технологии рассматривать газопламенное напыление и электродуговое напыление как вспомогательные операции по предварительной доставке и формированию слоя порошка на поверхности, а финишную обработку до требуемого размера и чистоты поверхности позволяет осуществить без припусков на обработку.

Электроконтактное припекание позволяет повысить износостойкость деталей машин, оборудования, транспортных средств при увеличении срока их эксплуатации в 2-3 раза путем замены многослойной наплавки на электроконтактное припекание порошковых материалов, а нанесение защитных покрытий напылением заменить газопламенным и электродуговым напылением с после-

дующим электроконтактным упрочнением. Электроконтактное припекание порошковых покрытий (ЭКПП) находит все большее применение в машиностроении. Этому способствуют высокая адгезионная прочность, низкая энергоемкость процесса, минимальные припуски на финишную обработку. Наиболее эффективна эта технология для упрочнения и восстановления деталей типа «вал». При этом температура детали не превышает $60...80^{\circ}\text{C}$, отсутствует термическое коробление и поводки детали. Технология ЭКПП относится к категории «холодных» и «сухих», не требует жидких технологических сред.

Получение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием порошковых износостойких материалов. Недостатком технологии электроконтактного припекания является краевой эффект, который не обеспечивает равномерности температуры и давления по ширине электрода [7]. Следствием этого является неоднородная пористость и адгезионная прочность покрытия. Этот недостаток можно устранить одновременно путем нанесения дискретных покрытий и за счет использования электрода с трапецевидной формой сечения. Конструкция этого электрода одновременно позволяет доуплотнять наносимый порошковый слой по краям упрочняемой поверхности и одновременно получать покрытие дискретной структуры. При этом мы можем наносить дискретные покрытия толщиной до 3 мм электроконтактным методом и использовать их при восстановлении и реставрации деталей с большой величиной износа. Фасонный электрод создает покрытие дискретной структуры (рис. 2).

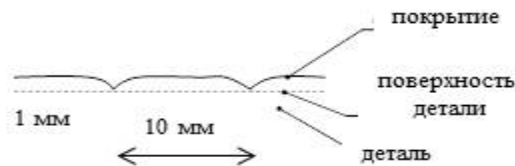


Рис. 2. Макроегеометрия поверхности дискретного покрытия

Выбором глубины электрода R_0-R , угла α и при постоянной его ширине $b = 10$ мм можно достичь равномерности давлений (рис. 3, б) и температур (рис. 3 а). Покрытия дискретной структуры при электроконтактном припекании, обеспечивая равномерное распределение удельного давления и температуры позволяют достичь не только минимальных значений пористости по всему сечению покрытия (рис. 4, а), но и его максимальной адгезионной прочности (рис. 4, б).

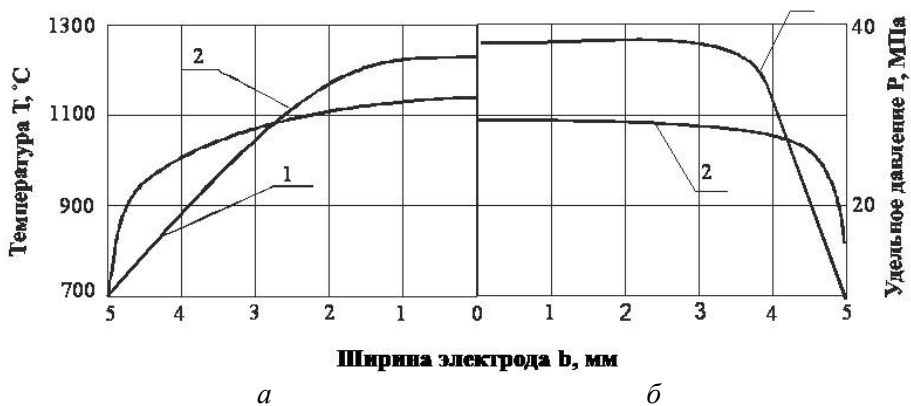


Рис. 3. Распределение по ширине покрытия: а) температуры; б) удельного давления. 1 — сплошное покрытие. 2 — дискретное покрытие

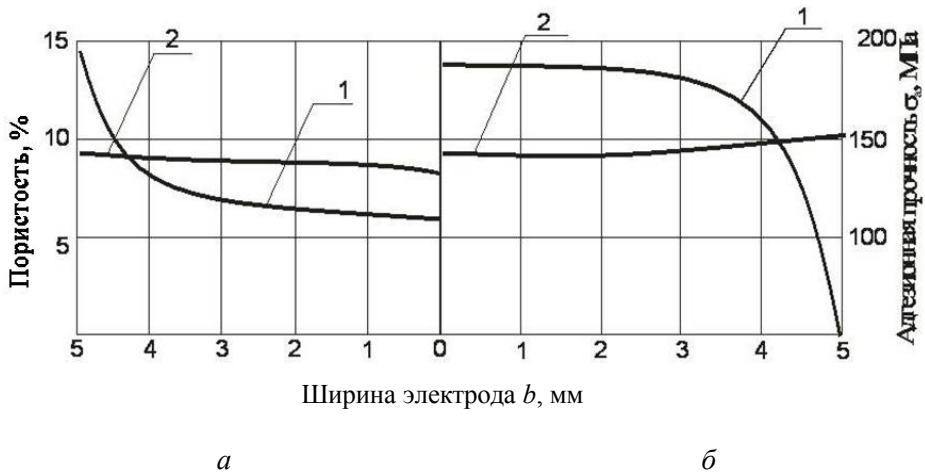


Рис. 4. Распределение: пористости покрытия *a*; распределение адгезионной прочности *b*; 1 – сплошное покрытие; 2 – дискретное покрытие

Электроконтактное припекание порошковых покрытий специальным электродом с трапецевидной формой сечения (рис. 1) позволяет реализовать принцип нанесения дискретных покрытий повышенной термомеханической стойкости. При этом следует отметить две особенности: дискретная структура образуется при непрерывном технологическом процессе ЭКПП; дискретность структуры образуется за счет промежутка между соседними витками спирали покрытия. Таким образом, дискретность структуры покрытия, его прерывистость образуется в направлении действия максимальных осевых напряжений, возникающих при эксплуатации детали.

Выбор геометрических параметров электродов для получения дискретных покрытий проводится эмпирически из условий равномерной пористости и адгезионной прочности покрытия [7]. Основная цель электроконтактного припекания покрытий дискретной структуры – обеспечить наряду с однородной пористостью и адгезионной прочностью минимальный уровень напряженно-деформируемого состояния покрытия под воздействием эксплуатационных нагрузок. Достичь поставленную цель можно путем выбора геометрических параметров дискретных покрытий, которые должны обеспечивать минимальную концентрацию напряжений как в слое покрытия, так и в плоскости адгезионного контакта. Параметры дискретных покрытий выбираются по напряженно-деформированному состоянию композиции основа-покрытие [7].

Методика исследований. Расчет напряженно-деформируемого состояния композиции основа-покрытие проводили методами численного анализа в лицензионном конечно-элементном комплексе MSC VisualNastran for Windows 2003. В большинстве случаев детали с покрытием, полученным электроконтактным припеканием, работают в условиях действия нормальной нагрузки. Поэтому для упрощения расчетов используем модель с упорядоченной схемой расположения дискретов на основе расчетной схемы, изображенной на рис. 65. Физико-механические свойства основы: $E_0 = 2$ ГПа, $\nu_0 = 0,25$; покрытия: $E_n = 1,5$ ГПа, $\nu_n = 0,3$. Базовые параметры покрытия $b = 10$ мм, $h = 1.5$ мм, $d = 2$ мм (рис. 5)

взяты согласно условиям эксплуатации, при которых покрытие работает на деформируемой основе.

Зависимость напряжений во всех рассматриваемых нами характерных точках композиции основа-покрытие от толщины дискретного покрытия и расстояния между дискретными участками показано на рис. 6-7.

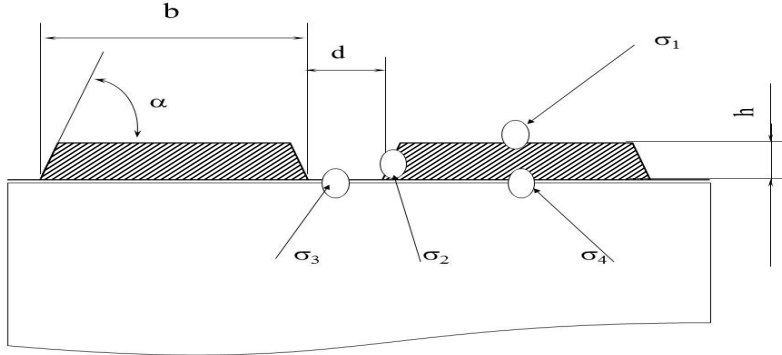


Рис. 5. Схематическое изображение композиции основа-покрытие с изменяемыми параметрами и зонами напряжений: σ_1 - напряжения в центре покрытия (зона когезионного растрескивания); σ_2 - напряжения на краю покрытия (зона адгезионного разрушения); σ_3 - напряжения в основе между дискретными; σ_4 - напряжения в основе под покрытием

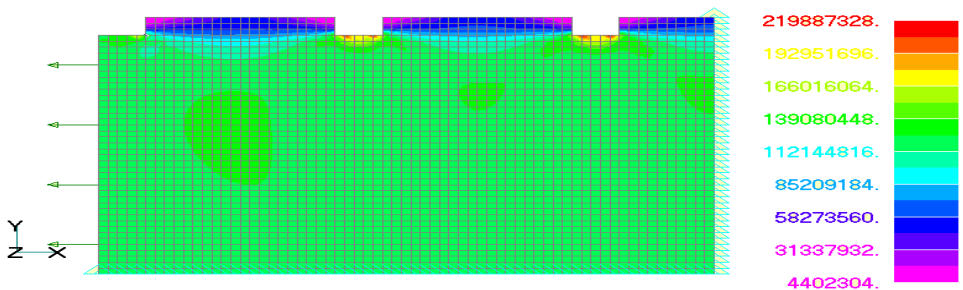


Рис. 6. Напряженно-деформированное состояние от действия силовой нагрузки вдоль оси x . Параметры покрытия: $d = 2,5$ мм; $D = 10$ мм; $h = 1,5$ мм

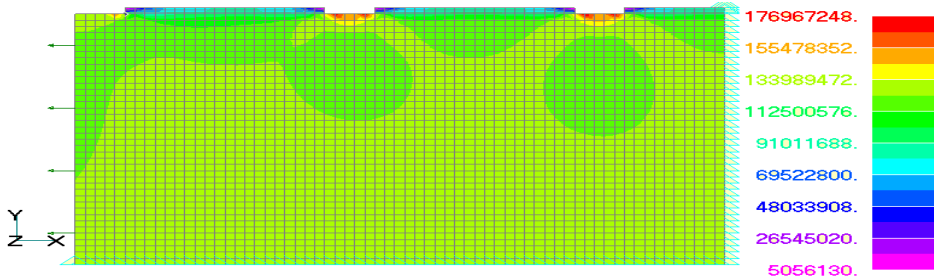


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние от действия силовой нагрузки вдоль оси x . Параметры покрытия: $d = 2,5$ мм; $D = 10$ мм, $h = 0,5$ мм

Анализ рис. 7-8 показывает, что чем толще покрытие, тем значительней становятся напряжения σ_3 в основе в зоне между дискретными. С уменьшением расстояния между дискретными соответственно растет концентрация напряжений σ_3 . Сравнение σ_3 в зоне между дискретными для покрытий различной толщины $h =$

0,5 и $h = 1,5$ показывает, что для разной толщины покрытий характер снижения напряжений с увеличением междискретного расстояния соблюдается.

Конечно-элементная модель композиции основа-покрытие с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу показана на рис. 8. Руководствуясь полученными графиками эквивалентных напряжений в покрытии (рис. 8), можно сделать вывод, что в покрытии возникают существенные скачки напряжений на его краях в зоне адгезионного контакта покрытия с основой. Покрытие с меньшей толщиной явно проигрывает по напряженному состоянию покрытию с большей толщиной.

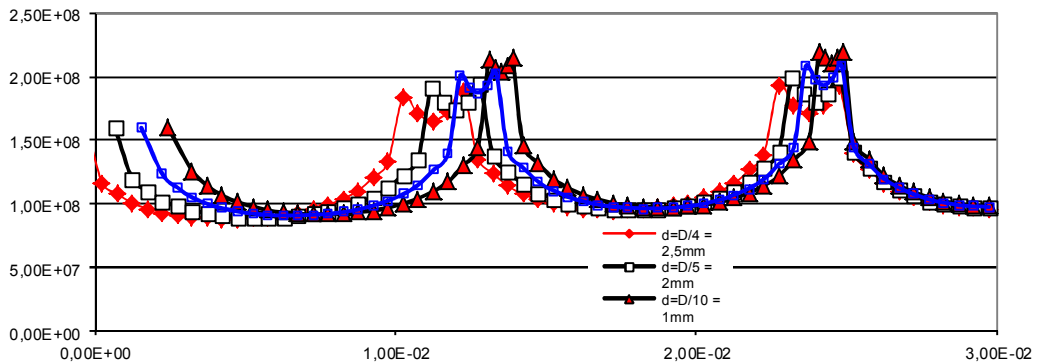


Рис. 8. Характер распределения эквивалентных напряжений σ_4 в основе под покрытием толщиной $h = 1,5$ мм и σ_3 в основе между дискретами в зависимости от междискретного расстояния d

Преимуществом толстого покрытия является то, что на его краях напряжения возрастают достаточно плавно по сравнению со скачкообразными пиками в тонком покрытии. Пики напряжений на краях тонкого покрытия можно сгладить варьированием угла α . При изменении высоты электрода h , при постоянной длине верхней его части s , формирующей форму покрытия и неизменной ширине b , меняется угол наклона кромки (рис. 6). в пределах от 35 до 90^0 (табл. 1).

Таблица 1

Характер изменения угла α при изменении высоты электрода

H	1,5	1,2	1	0,8	0,5	0,3
α	64	58,6	54,5	48,2	34,4	22,8

Влияние угла α на распределение эквивалентных напряжений в зоне адгезионного разрушения показано на рис. 10-11. Анализ проведенных исследований показал, что для обеспечения адгезионной прочности покрытия с основой при нормальном нагружении, необходимо соблюсти соотношения ширины покрытия к его высоте как $1/12,5$. При этом угол наклона кромки покрытия α составляет около 50 градусов.

Проведенные исследования позволили сделать вывод, что покрытия с размерами от 0 до 10 мм, от 10 до 20 мм и от 20 мм и выше. Первая часть относится к покрытиям с высокой адгезионной стойкостью, вторая часть к покрытиям прочностные характеристики которых слабо зависят от ширины покрытия, и третья часть - это те покрытия, которые по прочностным характеристикам ближе к сплошному покрытию.

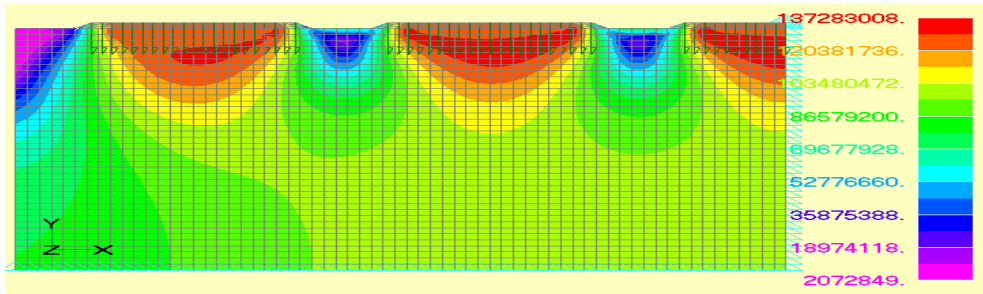


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в покрытии толщиной $h = 0.5$ и углом наклона кромок $\alpha = 55^\circ$ от действия нормальной нагрузки на дискретных участках

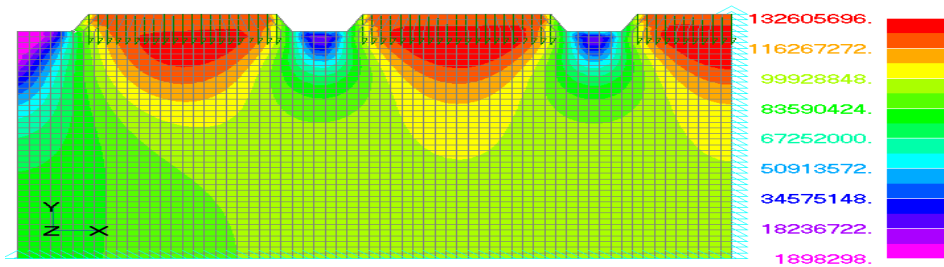


Рис. 10. Напряженное состояние в покрытии толщиной $h = 1,5$; с углом наклона кромок $\alpha = 35^\circ$ от действия нормальной нагрузки на дискретных участках

Проектирование дискретного покрытия с оптимальным соотношением геометрических параметров позволяет обеспечить стойкость конструкций, которые работают в условиях высоких контактных нагрузок и трения. Результаты исследований можно использовать при разработке технологических процессов формирования электроконтактных покрытий дискретной структуры при восстановлении деталей с целью повышения их износостойкости и срока службы.

Материалы для нанесения дискретных покрытий электроконтактным припеканием. Материалом покрытий могут быть как легкоплавкие, так и самые тугоплавкие труднодеформируемые твердосплавные порошковые материалы дисперсностью до 1 мм, включая гранулы (исключение составляют неэлектропроводные). При электроконтактном припекании используются порошковые материалы разных классов: самофлюсующиеся сплавы; интерметаллиды; тугоплавкие соединения (карбиды – TiC, Cr₂C₃, SiC, карбиды вольфрама, бориды и другие); цветные сплавы, нержавеющие стали в виде порошков, проволок, лент, шнуров, а также плакированные порошки.

Свойства. Покрытия имеют практически 100%-ную плотность. Прочность сцепления их с основой (180-220 МПа) обеспечивает надежную работу деталей с покрытием в самых экстремальных условиях. Толщина покрытий может составлять 0,1 -3 мм и более. Твердость покрытий задается твердостью его материала, которая сохраняет свою величину в материале покрытия (принцип технологической наследственности Ящерицына П.И.) и может находиться в пределах 25 – 62 HRC. Ресурс работы деталей увеличивается - в 4-10 раз. Получение качественного покрытия возможно только при поддержании требуемого соотношения между температурой процесса и величиной прилагаемого давления.

Применение дискретных покрытий. Значение дискретных покрытий для восстановления изношенных деталей. Технологию электроконтактного припекания дискретных покрытий (ЭКП ДП) целесообразно использовать для [7-9]:

- восстановления и упрочнения деталей узлов трения (осей валиков, коленчатых валов, направляющих) и посадочных мест под подшипники в корпусах и на валах транспортных средств;

- упрочнения и восстановления шеек коленчатых, распределительных валов роторов газоперекачивающих агрегатов, балансиров опорных катков гусеничных машин; пальцев;

- деталей типа «вал» спецтехники и авиационной техники;

- деталей ДВС;

- восстановления посадочных мест валов, особенно валов импортных, дорогостоящих и редких при увеличении срока их эксплуатации в 2-3 раза путем замены многослойной наплавки на электроконтактное припекание порошковых материалов.

Принцип покрытий дискретной структуры позволил решить основное противоречие, возникающее при использовании сверхтвердых поверхностных слоев - преодолеть их хрупкость. В слоях дискретной структуры обеспечивается ограничение роста напряжений и процесса трещинообразования, что многократно повышает их прочность и долговечность, полностью исключая их когезионное растрескивание и адгезионное отслоение. Принцип и технологии покрытий дискретной структуры повышенной термомеханической стойкости. Дискретные участки твердого износостойкого материала обеспечивают высокий коэффициент трения [1].

Покрытия дискретной структуры позволили по-новому подойти к технологии восстановления изношенных деталей. Особенностью большинства изношенных деталей является локальный характер и неравномерность износа. Учитывая эту особенность, разработана технология восстановления путем нанесения дискретного покрытия переменной толщины в соответствии с эпюрой неравномерного износа. Покрытие переменной толщины называем дифференциальным покрытием [8]. Дискретная структура покрытия позволяет (в отличии от традиционного сплошного покрытия) успешно применять поверхностное пластическое деформирование (ППД) до получения необходимого размера детали и чистоты поверхности. Режимы ППД обеспечивают заданный размер и чистоту поверхности. Полностью отпадает необходимость финишной механической обработки. Применение ППД проводится одновременно с нанесением дифференциального дискретного покрытия. Это является третьей особенностью технологии восстановления. Применение ППД для традиционных сплошных покрытий невозможно из-за их растрескивания и отслоения. Дискретные покрытия могут обрабатываться ППД до пластической деформации глубинных слоев без растрескивания и отслоения отдельных дискретных участков покрытия. Дифференциальное восстановление и упрочнение может осуществляться дискретными покрытиями переменной сплошности. В основу выбора величины сплошности положены зависимость износостойкости от сплошности [8]. Нанесение дискретного покрытия переменной сплошности в соответствии с эпюрой износа осуществляется путем изменения скорости перемещения инструмента (электрода). Типовая зависимость износостойкости от сплошности покрытия (отношение площади, которую занимает покрытие, к общей площади обрабатываемой поверхности) приведено на рис.11.



Рис.11. Зависимость весового износа от сплошности покрытия

Исследования показали [8], что для обеспечения требуемой износостойкости часто нет необходимости в получении сплошного покрытия, достаточно выполнить упрочнение отдельных участков, расположенных определенным образом на рабочей поверхности с определенной сплошностью Ψ ($\Psi = S / S_0$, где S – площадь, занимаемая дискретными участками, S_0 – рабочая площадь детали). Одним из главных вопросов при выборе покрытия является его толщина. Естественно стремление специалистов достигать при восстановлении изношенных деталей максимально возможных толщин покрытия. Однако несущая способность детали с покрытием в условиях эксплуатации имеет функциональную связь с толщиной покрытия. Установлены критериальные зависимости толщины покрытия, его адгезионной прочности, остаточных и термических напряжений, а также эксплуатационных нагрузок. Эти зависимости устанавливают предельные значения толщины покрытия сплошной структуры. Для увеличения предельной толщины покрытия следует переходить к дискретной структуре. Зависимость интенсивности изнашивания I_n от толщины дифференциальных дискретных покрытий h_n приведена на рис. 12.

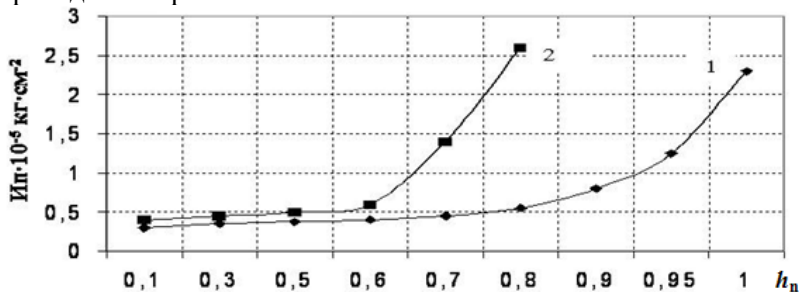


Рис.12. Зависимость интенсивности изнашивания от толщины покрытия: 1 – двухслойное покрытие, 2 – однослойное покрытие

Применение дискретных покрытий в судоремонтном производстве. Одной из сложных проблем судоремонтного производства является восстановление и упрочнение деталей низкой жесткости типа "вал". Повышение ресурса и снижение затрат на ремонт валов судовых машин и механизмов - одна из важнейших задач. Способы повышения ресурса валов, как наиболее дорогостоящих деталей, достаточно изучены, отработаны и продолжают совершенствоваться [9]. На рисунке 13 представлены примеры восстановленных шеек распределительных (рис. 13,а) и коленчатых (рис. 13,б) валов судовых машин и механизмов электроконтактным припеканием

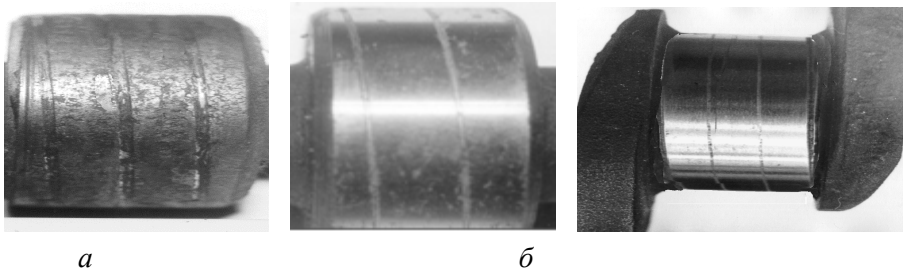


Рис. 13. Примеры покрытий дискретной структуры при восстановленных шеек распределительных (а) и коленчатых (б) валов судовых машин и механизмов электроконтактным припеканием

Восстановление валов СММ является важным резервом развития судоремонтного производства, повышения его эффективности. Использование восстановленных валов позволяет снизить затраты судоремонтных предприятий на запасные части, сохранить большое количество металла. Поэтому предлагаемый способ восстановления валов покрытиями дискретной структуры электроконтактным припеканием является весьма актуальной задачей и помогает сделать судоремонтное производство рентабельным.

Выводы. Разработаны технологические схемы формирования износостойких дискретных покрытий электроконтактным методом. Вариант покрытий дискретной структуры повышает несущую способность покрытий. Высокое качество покрытий обеспечивается импульсным характером процесса. Параметры дискретных покрытий выбираются по напряженно-деформированному состоянию композиции «основа-покрытие». Разработана программа компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «основа – покрытие» при электроконтактном припекании покрытий дискретной структуры, позволяющая проектировать дискретные покрытия. Разработаны типовые технологические процессы и оснастка ЭКП ДП для упрочнения и восстановления деталей типа «вал» судовых машин и механизмов, в частности распределительных и коленчатых валов СММ, компрессорной техники, автомобилей, спецтехники и других транспортных средств.

Список литературы

1. Ляшенко Б.А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів / Б.А. Ляшенко, В.С.Антонюк, О.Б. Сорока, А.В. Рутковський // Зб. Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин: міжнар. наук.-техн. конф. – Тернопіль.: ТДТУ ім. І. Пулюя . – 2004. - С. 381-386.
2. Ляшенко Б.А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры /Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // Технологические системы – 2001.– № 4. - С. 17-25.
3. Ляшенко Б.А. Упрочнение поверхности металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью [Электронный ресурс] / Б.А. Ляшенко, Ю.А. Кузема, М.С. Дигам, О.В. Цыгулев. – Киев, 1984. - (Препр. / АН УССР. ИПП). 57 с.
4. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 / Гончаров Віктор Григорович.– Х., 2008.– с.
5. Подригало М.А. Повышение надежности коленчатых валов дизельных двигателей нанесением дискретных покрытий / М.А. Подригало, В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков // Вестник НТУ «ХПИ» – Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ». – 2003. – № 4 – С. 115–123.

6. Подригало М.А. Методы упрочнения дискретными покрытиями шеек коленчатых валов автомобилей для повышения ресурса их работы / М.А. Подригало, В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков // Мир техники и технологии. – 2004. – № 10 – С. 52–55.

7. Лопата Л.А. Получение износостойких дискретных покрытий электроконтактным припеканием / Лопата Л.А., [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. - №3. - С. 12 - 17. – 2010.

8. Ляшенко Б.А. Восстановление деталей машин дифференциальными покрытиями дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, О.А. Розенберг, В.В. Ермолаев и др. // Тяжелое машиностроение – 2001. - №2. – С. 21-23.

9. Дискретные покрытия – эффективный способ упрочнения деталей автомобилей. // Сб. докл. Международная научно – техническая конференция «Транспорт, экология – устойчиво развитие» – Варна: Изд. ТУ – Варна, – 2003. – С. 282–289.

Стаття надійшла до редакції 27.05.2015

Б. А. ЛЯШЕНКО, Ю. В. ВОЛКОВ, Є. К. СОЛОВИХ, Л. А. ЛОПАТА

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ МАШИН
ТА МЕХАНІЗМІВ ПОКРИТТЯМИ ДИСКРЕТНОЇ СТРУКТУРИ.
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОКРИТТІВ ДИСКРЕТНОЇ СТРУК-
ТУРИ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНИМ ПРИПІКАННЯМ**

Відновлення валів СММ є важливим резервом розвитку судноремонтного виробництва, підвищення його ефективності. Розроблено технологічні схеми формування зносостійких дискретних покриттів електроконтактним методом на деталі типу вал. Варіант покриттів дискретної структури підвищує несучу здатність покриттів. Використання відновлених валів дозволяє знизити витрати судноремонтних підприємств на запасні частини, зберегти велику кількість металу.

Ключові слова: покриття дискретної структури, електроконтактне припикання, судові машини та механізми, зносостійкість, напружено-деформований стан.

B. A. LIASHENKO, Y. V. VOLKOV, Ye. K. SOLOVYKH, L A. LOPATA

IMPROVING WEAR RESISTANCE DETAILS OF SHIP AND MACHINERY COATINGS DISCRETE STRUCTURE. TECHNOLOGICAL PROVIDE COVERAGE DISCRETE STRUCTURE ELEKTROCONT SINTERING

Restoring shafts SMM is an important reserve of ship repair production, increasing its efficiency. Using reconstructed trees can reduce the cost of ship repair companies for spare parts, save a large amount of metal. Therefore, the proposed method of recovery shaft covers discrete structure electrocontact sintering is a very urgent task, and helps to make the production of cost-effective ship repair. Technological schemes of formation of wear-resistant coatings electrocontact discrete method. Variant covers discrete structure increases the carrying capacity of the coatings. High quality coating provides a pulsed nature of the process. Parameters of discrete coatings are selected on the stress-strain state of the composition "base-coat." A program of computer simulation of stress-strain state of the system, "the basis - coating" with Electrocontact sintering coating discrete structure allows the design of discrete coating. Developed standard processes and equipment EPC DP for hardening and restoration of details of the "shaft" of marine machinery, in particular distribution and crankshafts CMM, compressors, vehicles, construction equipment and other vehicles.

Keywords: coverages of discrete structure, electrocontact sintering, ship machines and mechanisms, wearproofness, tense-deformed state.

Ляшенко Борис Артемович – д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, ул. Тимирязевская, 2, г. Киев, Украина, 01014, тел.: +38 044 286 69 57, E-mail: coating.ipr@kiev.ua.

Волков Юрий Викторович – старший преподаватель, Одесская национальная морская академия. ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, Украина, 65029, тел.: +38 067 488 58 41, E-mail: volkov_y@ukr.net.

Соловых Евгений Константинович – д-р техн. наук, профессор, Кировоградский национальный технический университет, пр. Университетский, 8, г. Кировоград, Украина, 25006, тел.: +38 097 397 44 33, E-mail: eks_09@mail.ru.

Лопата Лариса Анатольевна – к.т.н., доц., старший научный сотрудник, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, ул. Тимирязевская, 2, г. Киев, Украина, 01014, тел.: +38 067 517 19 19, E-mail: beryuza@ukr.net.