

УДК 621.9:658.512

С. А. КЛИМЕНКО¹, А. Г. КОЛМАКОВ², В. Я. ЛЕБЕДЕВ³, В. И. БОРОДАВКО⁴**НАСЛЕДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ С ПОКРЫТИЯМИ**¹Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, Киев,²Институт металлургии и материаловедения им.А.А. Байкова РАН, Москва,³Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск,⁴ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск

(Поступила в редакцию 10.07.2015)

Для обеспечения качества машин необходимо всесторонне исследовать весь процесс изготовления и эксплуатации деталей, учитывая явление *технологической наследственности*. Это означает, что технологические операции и переходы следует рассматривать только во взаимосвязи, так как эксплуатационные характеристики изделий формируются всем комплексом технологических воздействий и изменяются при эксплуатации машины [1, 2].

Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевается *явление переноса свойств* обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим операциям и переходам, которое в дальнейшем влияет на эксплуатационные свойства изделия.

Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхностный слой детали во всем многообразии описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, испытывая воздействия технологических факторов.

Начальные показатели качества деталей машины в процессе эксплуатации изменяются. В большинстве случаев уже в период приработки существенно меняются шероховатость и структура поверхностных слоев деталей, а значения волнистости и геометрическая форма рабочих поверхностей остаются в пределах допускаемых величин, принятых при изготовлении практически до конца службы изделия (если оценка его работоспособности производится по параметрам точности). Остаточные напряжения и структура основного материала детали могут сохраняться до полного разрушения поверхностей.

В отличие от изготовления при восстановлении деталей явление наследственности в большей степени связано с этапом эксплуатации, т. е. с переносом свойств деталей, полученных в результате воздействия на них различных условий эксплуатации, на свойства деталей после восстановления.

Устранить остаточные явления разрушительных процессов для большинства деталей в период их восстановления невозможно, в результате они влияют на качество отдельных технологических операций и на окончательное качество восстановленных деталей. Например, поверхность изношенной детали всегда имеет слой толщиной до 200 мкм, содержащий различные дефекты кристаллической структуры, которые появились в результате фазовых превращений, образования вторичных структур, рекристаллизации, наклепа.

Дефектный слой отрицательно влияет на усталостную прочность восстановленных деталей, так как содержит концентраторы напряжений, снижает прочность сцепления покрытий с основным металлом, ухудшает показатели качества поверхности и т. д.

Положение усложняется тем, что в одном технологическом процессе восстановления участвуют различные по качеству заготовки. Ввиду этого в технологическом процессе восстановления (перед наплавкой или напылением) должны быть предусмотрены операции, снижающие

влияние эксплуатационной наследственности на качество последующих операций, такие как очистка загрязнений, удаление продуктов коррозии, устранение дефектного слоя и др.

Для большинства деталей, на которые наносятся наплавленные или напыленные покрытия, требуется дальнейшая механическая обработка для получения необходимых параметров точности размеров и качества поверхностей [3–6]. Однако обработка таких изделий значительно отличается от обработки деталей из традиционных конструкционных материалов, что связано с рядом специфических свойств, влияющих на их обрабатываемость: существенные макроотклонения на поверхности (рис. 1); неоднородный химический состав; неоднородная структура (рис. 2) со значительным количеством составляющих, повышенная пористость и трещиноватость, твердые включения и фрагменты шлаков, значительный оксидный слой на поверхности и внутренних фрагментах; различная твердость по поверхности и толщине (рис. 3). При этом механическая обработка покрытий характеризуется пониженной стойкостью инструмента и более высокой температурой в зоне резания по сравнению с обработкой материалов того же химического состава в литом, ковном или штампованном состояниях; значительными изменениями сил резания и контактных напряжений на поверхностях инструмента; нестабильностью процесса резания. Таким образом, высокие механические свойства покрытий, обеспечивающие их функциональные свойства и работоспособность деталей при эксплуатации, снижают обрабатываемость покрытий резанием, затрудняя достижение состояния поверхностного слоя изделий, требуемого условиями эксплуатации.

Для количественной оценки влияния особенностей деталей с покрытиями (наличие макро- и микронеровностей на поверхности, отклонений формы, гетерогенности структуры и неоднородности механических свойств покрытий) на процесс обработки перспективно применение

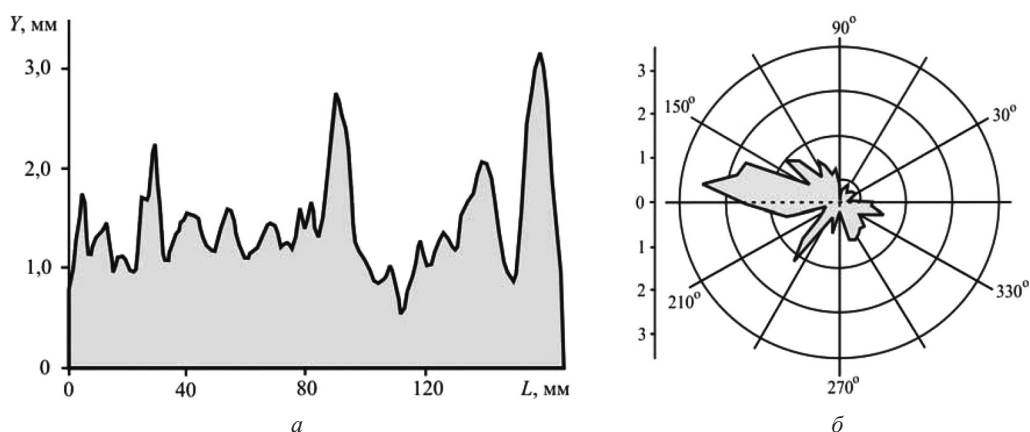


Рис. 1. Профиль осевого сечения (а) и отклонение в радиальном сечении (б) поверхности, восстановленной ручной электродуговой наплавкой порошковой проволокой ПП-Нп-25Х5ФМС



Рис. 2. Аморфно-кристаллическая структура покрытия $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ из порошковой проволоки, напыленного электродуговым методом

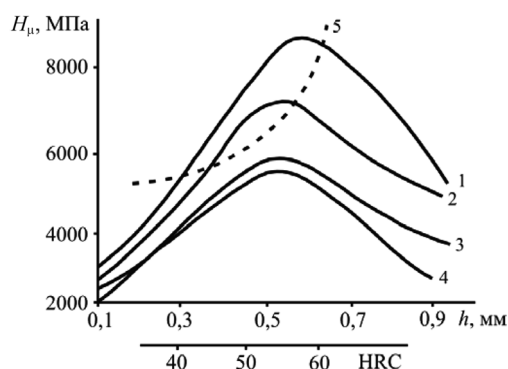


Рис. 3. Изменение микротвердости по толщине газопламенных порошковых покрытий системы Ni – Cr – B – Si (1–4) и соотношение микротвердости и твердости (5) покрытий: 1 – ПГ-10Н-01; 2 – ПГ-12Н-01; 3 – ПГ-12Н-02; 4 – ПГ-АН9

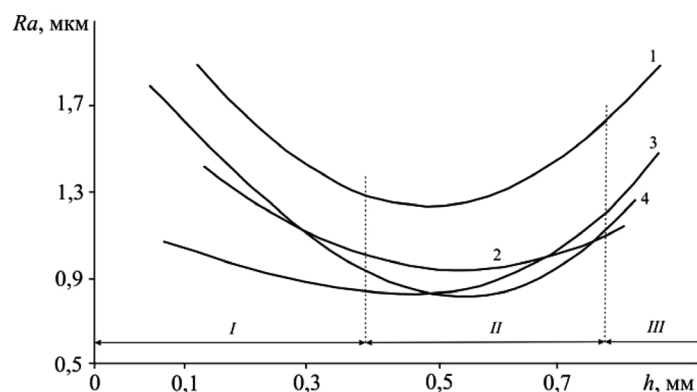


Рис. 4. Изменение шероховатости обработанной поверхности по глубине слоя напыленных покрытий h (исходная толщина покрытия 1,2 мм): 1 – ПГ-12Н-01; 2 – ПГ-12Н-02; 3 – ПГ-АН9; 4 – ПГ-10Н-01

фрактальных представлений о совокупности ординат профиля поверхности покрытия, структуре и механических свойствах [7]. По изображению топограммы исходной поверхности, структуры или по визуальному отображению совокупности механических свойств покрытия определяются величины фрактальных размерностей совокупности ординат профиля поверхности D_p , структуры D_c или механических свойств D_s покрытия.

Отмеченные характеристики позволяют анализировать процесс обработки и прогнозировать его выходные показатели. Особенности структуры покрытия и поверхности изделия с покрытием должны учитываться как при назначении технологического метода и режимов обработки, так и параметров инструментов.

Как отмечалось, не весь слой покрытий по толщине имеет стабильные показатели качества. Переходный слой между основным металлом и покрытием отличается от других его участков химическим составом, структурой и свойствами. Верхний слой включает шлаки и другие дефекты, имеет повышенную пористость. Применение в таких условиях расчетно-аналитического метода определения величины припуска на обработку не учитывает особенностей покрытия (в частности, изменение состояния слоя покрытия по толщине).

Можно обеспечить достоверную величину припуска на обработку, проанализировав изменение какого-либо показателя качества поверхности (например, шероховатость или микротвердость) по глубине покрытия (рис. 3, 4). Логично предположить, что средний участок (II) на зависимостях $Ra \sim f(h)$, $H_\mu \sim f(h)$ обладает лучшими эксплуатационными показателями. Необходимо, чтобы слой покрытия, непосредственно определяющий работоспособность изделия, находился в среднем участке (II). Определив размеры участка со стабильными показателями качества и разместив в нем слой покрытия, обеспечивающий ресурс работы, с учетом величины переходного участка необходимо скорректировать размеры исходной заготовки под нанесение покрытия.

Процесс обработки должен вестись так, чтобы с поверхности изделия удалялся слой покрытия с худшими механическими свойствами и к обработанной поверхности примыкали слои покрытия с лучшими характеристиками. Для одного и того же покрытия расположение оптимальных физико-механических свойств по глубине слоя зависит от толщины, а для различных покрытий – от их твердости. Сопоставляя припуски на обработку различных покрытий (ПГ-АН9, ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-01, ПГ-12Н-02 с диапазоном твердости 35–62 HRC) по критериям наибольшей микротвердости (рис. 3) или наименьшей шероховатости обработанной поверхности (рис. 4), можно сделать вывод, что их значения зависят от твердости покрытия и его толщины. Рекомендуемая глубина резания при точении покрытий системы Ni – Cr – В – Si за один проход имеет вид

$$(0,54 - 2,45 \cdot 10^{-3} \text{HRC})h \leq t \leq (0,54 - 2,16 \cdot 10^{-3} \text{HRC})h,$$

где h – толщина покрытия, мм.

В общем виде при обработке покрытий глубина резания имеет переменную (в пределах неровного слоя покрытия) $t_{\text{прм}}$ и постоянную (ниже неровного слоя покрытия) $t_{\text{пст}}$ составляющие. Учитывая фрактальный характер совокупности ординат профиля поверхности покрытия, обеспечивая

масштабную инвариантность, определяем переменную составляющую глубины резания при обработке покрытий зависимостью

$$t_{\text{прм}} \sim C(\delta^{3-D_p}/LR^2),$$

где δ – характерный размер ячейки, использованной для определения фрактальной размерности совокупности ординат профиля поверхности D_p ; L – длина обрабатываемого образца; R – радиус образца ниже неровного слоя покрытия.

Величина оптимальной скорости резания связана с гетерогенностью структуры покрытия. Процесс резания характеризуется комплексным термобарическим воздействием на материал поверхностного слоя обрабатываемого изделия и следствием этого воздействия является изменение пористости поверхности покрытия. В результате действия сил со стороны задней поверхности инструмента при относительно невысокой скорости резания и температурном воздействии на обрабатываемый материал при повышенных скоростях резания величина открытой пористости покрытия изменяется относительно его исходного значения. Оптимальная скорость резания выбирается исходя из обеспечения наименее дефектного поверхностного слоя изделия.

Результаты исследований и практический опыт показывают перспективность точения твердых покрытий на основе Fe, Ni, Co инструментом с поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе синтетического алмаза (ПКА) и кубического нитрида бора (ПКНБ) [8]. Инструментом с ПКНБ марок «киборит» и «борсинит» в зависимости от механических свойств покрытия можно осуществлять обработку с глубиной резания до 2,0–2,5 мм, удаляя дефектный поверхностный слой за один проход.

Инструменты с ПКА перспективны для обработки керамических покрытий (Al_2O_3 , TiO_2 и др.), напыленных плазменным и детонационным методами.

Эффективность применения инструментов, оснащенных ПСТМ, возрастает с увеличением значения твердости покрытия, а также в случае обработки покрытий с абразивными включениями (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Ориентировочные скорости резания (м/с) при точении покрытий

Материал инструмента		HRC наплавленных материалов			
		30–40	40–50	50–60	60–65
Твердый сплав:	ВК	0,25–0,28	0,18–0,25	1,16–0,18	0,83–1,16
	ТК	0,30–0,35	0,23–0,30	0,18–0,23	0,13–0,18
	ТТК	0,35–0,40	0,28–0,35	0,23–0,28	0,20–0,23
Безвольфрамовый твердый сплав	ТН 20	0,27–0,3	0,22–0,27	0,18–0,22	0,16–0,18
Керамика	ВОК 60	0,50–0,55	0,45–0,50	0,45	0,35–0,40
ПКНБ:	Композит 01	1,20–1,25	1,10–1,20	1,00–1,10	0,90–1,00
	Композит 05	1,30–1,40	1,20–1,30	1,10–1,20	1,00–1,10
	Композит 09	1,80–2,00	1,60–1,80	1,60	1,50
	Композит 10	1,80–2,00	1,60–1,80	1,50–1,60	1,35–1,50
	Киборит	1,80–2,00	1,60–1,80	1,50–1,60	1,35–1,50
	Томал 10	1,60–1,80	1,50–1,60	1,45–1,50	1,30–1,35

При обработке твердых покрытий резаками с ПСТМ средняя температура в зоне резания достигает 1000–1200 °С, а локальные температуры на площадках контакта значительно выше.

В структуре покрытий имеются составляющие с различными теплофизическими свойствами со случайным характером распределения. Фронт теплового поля при обработке покрытий относится к категории фрактальных кривых, так как он распространяется по фазам с высокой теплопроводностью. В то же время теплопроводность покрытия связана с особенностями его структуры, в частности, с количеством и характером распределения пор и фаз с различными теплофизическими свойствами. Коэффициент теплопроводности материала с гетерогенной структурой определяется как $\lambda = \lambda_{\text{ц}} / (0,04)^{1-D_f}$, где $\lambda_{\text{ц}}$ – коэффициент теплопроводности аналогичного по хи-

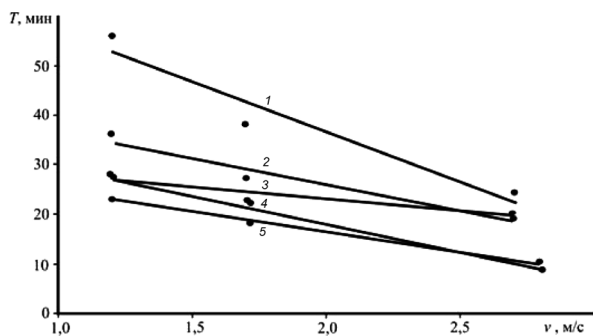


Рис. 5. Зависимость стойкости инструмента ($h_3 = 0,25$ мм) от скорости резания при точении ($S = 0,05$ мм/об; $t = 0,2$ мм) напыленных покрытий: 1 – газопламенное, из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,32 \pm 0,012$); 2 – электродуговое, из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,57 \pm 0,023$); 3 – газопламенное, порошком $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,76 \pm 0,036$); 4 – электродуговое, из порошковой проволоки $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,68 \pm 0,025$); 5 – газопламенное, порошком $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,82 \pm 0,038$)

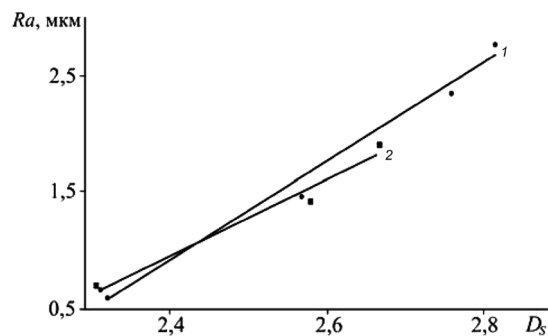


Рис. 6. Зависимость шероховатости обработанной поверхности Ra напыленных покрытий от величины фрактальной размерности совокупности механических свойств D_s : 1 – газопламенное, из порошковой проволоки $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,32$); электродуговое, из порошковых проволок $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,57$), $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,68$); газопламенное, порошками $Fe_{80}B_{20}$ ($D_s = 2,76$), $Fe_{79}Cr_{16}B_5$ ($D_s = 2,82$); 2 – газопламенное, порошком $Fe_{78}B_{10}Si_{12}$

мическому составу однородного материала; D_f – фрактальная размерность фронта теплового поля. Учет гетерогенности структуры обрабатываемого покрытия позволяет определить температуру резания с большей точностью.

Стойкость инструмента определяется физико-механическими свойствами его материала, режимами резания, структурой и свойствами обрабатываемого покрытия. С увеличением неоднородности структуры покрытия стойкость режущего инструмента снижается (рис. 5). Обработка резанием покрытия, структура которого характеризуется большей величиной фрактальной размерности, сопровождается ускоренным износом инструмента, что связано, прежде всего, с интенсификацией микроударного нагружения на его контактные участки и возрастанием нестабильности процесса резания.

С увеличением скорости резания снижается влияние неоднородности структуры покрытия на интенсивность изнашивания инструмента. Поэтому процесс обработки покрытий с более гетерогенной структурой целесообразно проводить с высокими скоростями резания.

Гетерогенность структуры покрытия оказывает непосредственное влияние на качество обработанной поверхности: поверхность с меньшей величиной шероховатости формируется при обработке покрытий с однородной структурой (рис. 6).

Наряду с точением шлифование является наиболее распространенным методом обработки покрытий, особенно покрытий высокой твердости. Для обработки наплавленных и напыленных покрытий применяются инструменты из абразивных (электрокорунд, карбид кремния) и сверхтвердых материалов. Однако обработка покрытий высокой твердости обычными абразивными инструментами часто не обеспечивает требуемых эксплуатационных свойств деталей и для их шлифования применяются алмазные инструменты, а для доводки – алмазные пасты.

Особенности шлифования при съеме неравномерного припуска покрытий обусловлены динамикой переходных процессов взаимодействия инструмента с обрабатываемой деталью, кинематикой съема неравномерного припуска, неоднородностью физико-механических свойств обрабатываемого покрытия. При обработке со съемом неравномерного припуска инструмент испытывает дополнительные динамические нагрузки, которые приводят к более высокому уровню напряженности процесса резания по сравнению с установившимся процессом шлифования.

В начальный момент контакта шлифовального круга с покрытием в силу инерционности системы в результате деформирования и выборки зазоров в узлах крепления и передаточных звеньях привода инструмента и заготовки увеличивается динамическая сила взаимодействия. Система заготовка – инструмент не успевает отреагировать на импульс силы и получить перемещение, соответствующее упругим отжатию в конкретный момент обработки. Вследствие уменьшения деформаций в системе шлифование в начальный момент происходит с большими толщинами

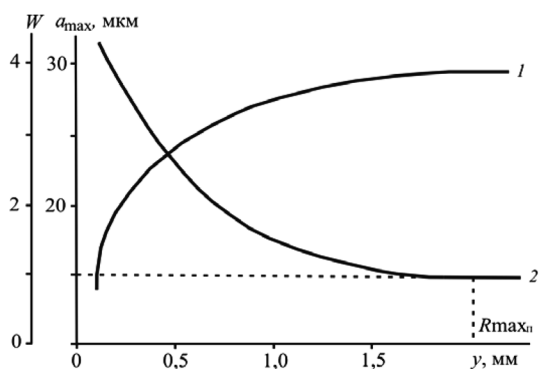


Рис. 7. Зависимость максимальной толщины единичного среза a_{\max} (1) и соотношения W (2) от величины неровностей на наплавленной поверхности ($S_{\text{пр}} = 16 \text{ мкм/дв.ход}$; $R_{\text{max}_n} = 2 \text{ мм}$)

шее значение при максимальной высоте неровностей $y = R_{\text{max}_n}$. При этом максимальная толщина единичного среза a_{\max} возрастает. Таким образом, одна из особенностей шлифования неравномерного припуска покрытия – изменение удельного расхода алмазов в инструменте в зависимости от состояния поверхности покрытия, характеризуемого фрактальной размерностью совокупности ординат профиля.

Снизить соотношение W при обработке неравномерного припуска покрытия можно увеличением поперечной подачи.

Повышенной стойкостью при окончательном шлифовании наплавленных деталей характеризуются прерывистые круги, их самозатачивание обусловлено возникновением динамических сил при врезании зерен в материал покрытия, что вызывает расщепление зерен и разрушение связки. Послойное удаление припуска зернами фронтальной поверхности инструмента уменьшает силу резания для каждого зерна и снижает температуру в зоне шлифования. Уменьшение величин силы резания и температуры снижает интенсивность адгезионных и диффузионных процессов, протекающих между покрытием и инструментом, и, следовательно, засаливание круга. Радиальный износ прерывистых кругов на 15–20% меньше, а период стойкости почти в три раза больше, чем у обычных кругов. Применение прерывистых кругов позволяет уменьшить шероховатости обработанной поверхности и исключить возникновение шлифовочных трещин и прижогов в поверхностном слое покрытия.

Для снижения теплонапряженности процесса алмазного шлифования и создания кругов широкой номенклатуры разработан инструмент типа «ежик», его основу составляет алмазная шлифовальная лента на каучуковой основе, на поверхности которой в определенном порядке расположено множество перекрывающихся друг друга алмазосодержащих усеченных конусов. Конические элементы в зависимости от условий обработки могут перемещаться, вдавливаясь в подложку на определенную глубину, не оказывая влияния на соседние участки рабочей поверхности инструмента. В процессе обработки происходит изменение размеров элементов, что уменьшает засаливание, способствует проникновению смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) в зону резания и интенсифицирует процесс обработки. Припуск равномернее распределяется на режущей части инструмента.

Обработка деталей с твердыми покрытиями сопряжена с образованием шлифовочных трещин и прижогов. Возникновению трещин способствует состояние поверхности покрытия, которое связано с дисбалансом обрабатываемого изделия, особенностями структуры покрытия, затуплением и засаливанием шлифовального круга. Для устранения прижогов на обработанной поверхности необходимо обеспечить выполнение условия $Q_{\max}(M, t) \leq Q_c$, где Q_{\max} – максимальная температура шлифования; Q_c – температура структурных превращений в покрытии. Трещин на обрабатываемой поверхности можно избежать, если текущие значения напряжений не превысят предельно допустимых величин для покрытия и материала основы. При этом отрыв покрытия от основы можно контролировать по условию $\sigma_{xx}(M, \alpha, E) < [\tau]_{\text{сц}}$, где σ_{xx} – термомеханиче-

срезаемого слоя. В этих условиях динамическую нагруженность режущих зерен можно снизить, прежде всего, уменьшением скоростей заготовки и шлифовального круга. Первое предпочтительнее, так как снижение скорости шлифовального круга приводит к увеличению толщины срезаемого слоя. Для повышения стойкости алмазных кругов при обработке покрытий особенно в начальный период рекомендуется использование прочных алмазов марок АС 15, АС 20, АС 32.

На рис. 7 приведена зависимость изменения соотношения W удельных расходов алмазов при удалении неравномерного W_n и сплошного $W_{\text{сп}}$ припусков от высоты неровностей y на поверхности покрытия. Функция W монотонно убывает, принимая наимень-

ские напряжения, действующие перпендикулярно к обрабатываемой поверхности; α_t – температурный коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости покрытия; M – координата покрытия, в которой текущие значения напряжений достигают максимальной величины; $[\tau]_{\text{сц}}$ – предельные значения напряжений сцепления покрытия с материалом основы.

Сетка трещин на обработанной поверхности возникает в случае $\max(\sigma_{yy}, \sigma_{xx}) > [\sigma]_{\text{пч}}$, где σ_{yy} – напряжения, действующие в плоскости, параллельной обрабатываемой; $[\sigma]_{\text{пч}}$ – предел прочности покрытия.

Анализ температуры шлифования показывает, что на температуру покрытия и основы влияют глубина резания и применяемая СОТС. При этом особенности распространения тепла, а также различие коэффициентов температурного расширения покрытия и материала основы могут привести к возникновению значительных напряжений на границе покрытие – основа и отслоению покрытия.

Алмазные круги на металлической связке из-за засаливания быстро теряют режущую способность и поэтому их использование затруднено. Лучшие результаты показывают алмазные круги на органической связке В2-01 с агрегированными алмазами (А2), а в некоторых случаях – круги на керамической связке К1-01. При обработке покрытий из порошков на основе никеля или железа алмазными кругами на органических и керамических связках по сравнению с абразивными кругами из карбида кремния зеленого не засаливаются и позволяют производить шлифование с большей производительностью (в 2–3 раза) при меньшей эффективной мощности.

Ленточное алмазное шлифование покрытий имеет ряд преимуществ по сравнению со шлифованием кругами (высокая размерная стойкость инструмента, возможности обработки фасонных поверхностей, низкая шероховатость обработанных поверхностей, более простое оборудование и др.). Преимуществами ленточного шлифования являются также уменьшение сил резания и теплонапряженности процесса, постоянство скорости резания, а также исключение процессов балансировки и правки инструмента. При ленточном шлифовании зерно абразива может работать как в режиме закрепленного лезвийного инструмента, так и в режиме исключительной податливости и самоориентации, при котором расположение зерен по высоте нивелируется, а нагрузка между ними распределяется равномерно.

Полированием эластичными инструментами можно обрабатывать покрытия практически любого вида, нанесенные на поверхности различной формы. Припуск обычно составляет 0,01–0,03 мм, достигаемая шероховатость поверхности Ra 0,02–0,16. При финишной обработке деталей с покрытиями эффективно применение лепестковых кругов КЛ с рабочими элементами на основе карбида кремния, корунда, синтетических алмазов и КНБ (рис. 8).

В процессе резания в поверхностных слоях обрабатываемых материалов происходят структурно-фазовые превращения, приводящие к изменению их упрочненного состояния по сравнению с внутренними слоями материала. Исследования (рис. 9), проведенные при точении наплавленных покрытий мартенситного класса твердостью 45–55 HRC, показали, что при обработке со скоростью резания до 1,5 м/с происходит некоторое уширение интегральных рентгеновских линий (110) и (211) α -фазы. Этим же скоростям резания соответствует снижение количества остаточного аустенита

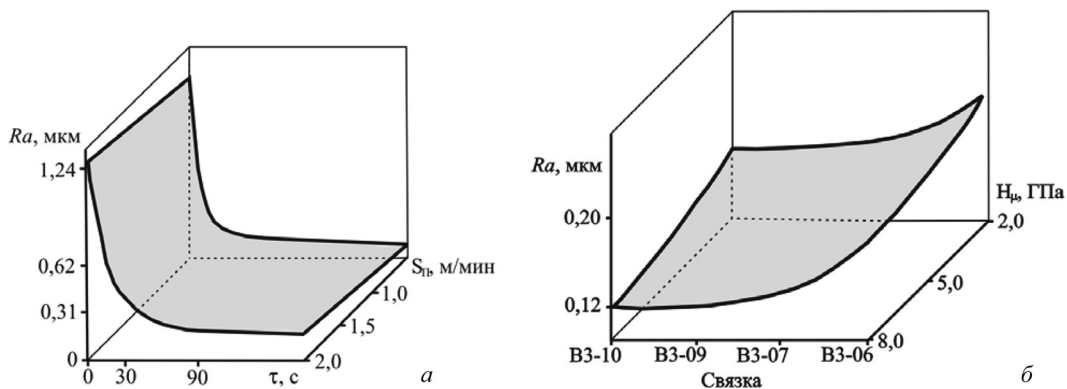


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности напыленного покрытия ПН85Ю15 от времени полирования и поперечной подачи (а); от микротвердости покрытия и связки (эластичности) (б) алмазного лепесткового круга

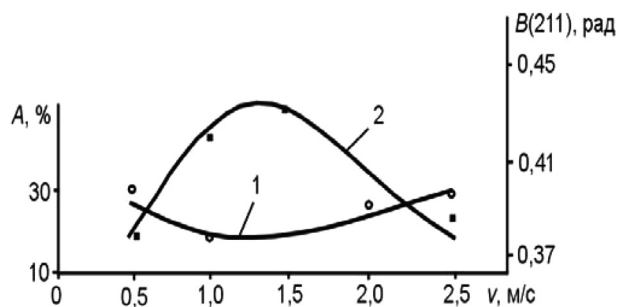


Рис. 9. Влияние скорости резания на упрочнение и структуру поверхностного слоя покрытия ЛС-5Х4В3МФС: 1 – A ; 2 – $B(211)$

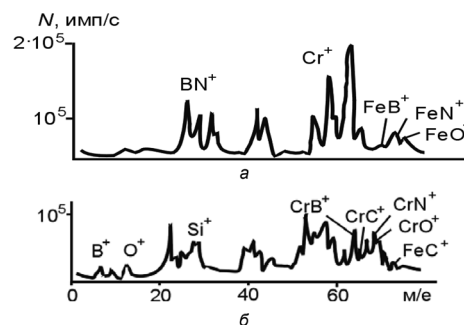


Рис. 10. Масс-спектры положительных вторичных ионов химического состава обработанной поверхности наплавки ЛС-5Х4В3МФС (а) и поверхности наплавки после обработки и травления (б)

в обработанной поверхности. Дальнейшее увеличение скорости резания приводит к росту температуры в зоне обработки, что способствует появлению элементов разупрочнения поверхностного слоя, проявляющемуся в росте количества остаточного аустенита. Наблюдается тенденция к снятию микрорискажений решетки, являющихся следствием пластического деформирования при резании.

Наряду с изменением структуры поверхностного слоя при тчении происходят химические превращения на обработанной поверхности. Химический состав вновь образующихся соединений определяется составом контактирующих материалов и окружающей среды. В оже-спектрах с обработанной поверхности металла после контактирования с ПСТМ на основе КНБ присутствуют линии, соответствующие матричным элементам поликристалла, а спектры вторичных ионов (рис. 10) имеют пики, соответствующие ионам соединений типа BN^+ , MeO^+ , MeC^+ , MeB^+ , MeN^+ . После обработки сплавов, содержащих титан, в масс-спектре отрицательных вторичных ионов присутствуют пики, соответствующие TiB^- , TiN^- , TiB_2^- , TiN_2^- . Различные соединения, образовавшиеся на обработанной поверхности, распределены по ней неравномерно, что связано с неоднородностью обрабатываемого материала по химическому составу.

Обработка деталей резами из ПСТМ на основе КНБ способствует повышению их эксплуатационных свойств при учете, что химические соединения металлов с азотом и бором обладают повышенными твердостью, прочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью,

Образование остаточных напряжений в результате механической обработки является сложным процессом. Результирующая величина остаточных напряжений определяется влиянием всех стадий технологического процесса восстановления детали – от исходных напряжений, сформировавшихся при первичной эксплуатации, до напряжений от процессов формирования покрытия и механической обработки.

Для управления состоянием поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами изделий с покрытиями эффективным является оценка по критериям, интегрально учитывающим геометрические параметры поверхности изделий, структурные особенности и механические свойства гетерогенного поверхностного слоя покрытия. Такая обработка может производиться на основании анализа результатов, полученных деформационно-спектральным методом микромеханических испытаний.

Представив поверхностный слой покрытия как систему случайно распределенных структурно-чувствительных барьеров различной мощности [9], деформационно-спектральный анализ позволяет оценить уровень и стабильность прочностных и деформационных свойств покрытия статистическими параметрами (математическое ожидание силы сопротивления контактного взаимодействия между индентором и исследуемым покрытием, дисперсия силы контактного взаимодействия, энергетическая спектральная плотность распределения силы контактного взаимодействия индентора с исследуемым покрытием), которые учитывают упрочнение, напряженно-деформированное состояние, особенности гетерогенной структуры поверхностного слоя (рис. 11).

Как видно, состояние поверхностного слоя определяется значительным числом различных параметров. По этой причине существенный интерес представляет выбор ограниченного количества параметров, позволяющих достаточно полно охарактеризовать состояние поверхностного

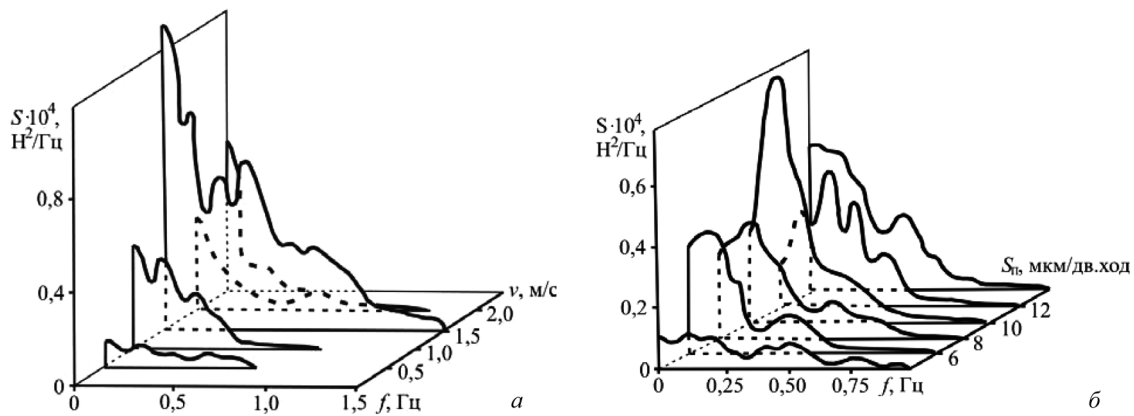


Рис. 11. Энергетическая спектральная плотность распределения силы контактного взаимодействия для поверхностного слоя после точения инструментом с ПКНБ типа «киборит» покрытия, наплавленного спеченной лентой ЛС-5Х4ВЗМФС (а); алмазно-искрового шлифования покрытия, наплавленного порошковой проволокой ПП-Нп-3ХВ9ХЗСФ (б)

слоя, а также его влияние на эксплуатационные свойства деталей. В качестве примера в табл. 2 представлены результаты корреляционного анализа связей характеристик, определяющих микрогеометрию поверхности, напряженное и энергетическое состояние поверхностного слоя, сформированного при точении.

Таблица 2. Коэффициенты парной корреляции между параметрами состояния наплавленного поверхностного слоя после точения

Параметр	Ra	Sm	$\text{tg } \alpha$	ρ	Δ	a	b	σ_{\max}	h_0	J	η
Ra	–	–0,91	0,95	–0,17	0,78	–0,48	0,95	0,68	0,44	–0,26	–0,49
Sm		–	–0,40	0,94	–0,60	0,06	0,52	–0,66	–0,75	–0,63	–0,38
$\text{tg } \alpha$			–	0,27	0,81	–0,40	–0,97	0,29	0,42	–0,18	–0,65
ρ				–	–0,58	0,03	0,22	–0,89	–0,65	0,48	–0,19
Δ					–	–0,04	–0,72	0,56	0,71	0,61	–0,34
a						–	0,57	0,17	–0,34	–0,25	0,69
b							–	–0,39	–0,59	–0,29	0,96
σ_{\max}								–	0,52	0,53	–0,19
h_0									–	–0,35	–0,27
J										–	0,91
η											–

Примечание. $[r] = 0,7067$ при $q = 97,5\%$.

Для различных технологий обработки эксплуатационные свойства изделий определяются своим комплексом параметров состояния поверхностного слоя. Применительно к износу деталей с покрытиями в эксплуатации получены зависимости:

для наплавленных деталей, обработанных точением:

$$И = 3,08 + 4,73\Delta - 6,8 \cdot 10^{-3}Sm + 4,5 \cdot 10^{-4}(\sigma_{\max} + 300) + 2,6 \cdot 10^3 J,$$

где Sm – средний шаг неровностей профиля ($\text{tg } \alpha$ характеризует угол наклона неровностей профиля); Δ – комплексный параметр Комбалова–Крагельского (a , b – характеристики профиля); σ_{\max} – максимальная величина остаточных напряжений в поверхностном слое (на глубине h_0); J – средняя величина экзотока с поверхности (η – эмиссионная неоднородность);

для наплавленных деталей, обработанных алмазным электроискровым шлифованием:

$$И = 8,193Ra^{0,256} \rho^{-0,184} \sigma_0^{-0,227} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial x_0} \right|^{-0,361} H_{\mu 0}^{-0,158},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля неровностей; ρ – радиус вершины неровностей; σ_0 – величина поверхностных остаточных напряжений; $\frac{\partial \sigma}{\partial x_0}$ – градиент напряжений в поверхностном слое;

для напыленных деталей, обработанных алмазным лепестковым кругом:

$$I = 0,48 + 0,4R_{\max} - 0,049H_{\mu 0} + 0,0009\sigma_0,$$

где R_{\max} – максимальная высота неровностей профиля; $H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхности; σ_0 – поверхностные остаточные напряжения.

Анализ результатов показывает, что более 80 % вариации износа деталей с покрытиями объясняется изменением приведенных характеристик.

Принимая во внимание, что значения параметров состояния поверхностного слоя обусловлены показателями процессов обработки с учетом особенностей обрабатываемых материалов, подобные зависимости могут быть представлены в виде, связывающем эксплуатационные характеристики с режимами резания, геометрическими параметрами инструментов и другими показателями условий обработки.

Учитывая, что для начальных условий изнашивания характерно формирование в поверхностном слое деталей приработанного состояния как по геометрическим, так и физико-механическим и химическим параметрам, направленное создание при механической обработке в поверхностном слое деталей состояния, близкого к приработанному, обеспечивает существенное повышение износостойкости деталей машин, в том числе и с покрытиями.

Аналогичное заключение справедливо и для деталей, работающих в других условиях эксплуатационного нагружения – на коррозионную стойкость, выносливость, контактную жесткость, герметичность и т.д.

Технологии обработки покрытий – неотъемлемая часть промышленного производства упрочненных и восстановленных деталей машин. Знание основных закономерностей процессов, имеющих место в зоне обработки, с учетом принципов технологической наследственности для технологического обеспечения качества, позволяет использовать в деталях машин современные покрытия – материалы с высокими потенциальными свойствами, формировать в их поверхностном слое требуемое по условиям эксплуатации состояние.

Исследования частично поддержаны грантами БРФФИ: белорусско-украинским Т13К-033 и белорусско-российским Т14Р-198.

Литература

1. Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. Технологические основы управления качеством машин. М., 2003.
2. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / Под общ. ред. П. А. Витязя. Мн., 2010.
3. Рыжов Э. В., Клименко С. А., Гуцаленко О. Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. К., 1994.
4. Клименко С. А., Муковоз Ю. А., Полонський Л. Г., Мельничук П. П. Точение износостойких защитных покрытий. К., 1997.
5. Обработка резанием деталей с покрытиями / Под ред. С.А. Клименко. К., 2011.
6. Бородавко В. И., Ивашко В. С., Клименко С. А., Хейфец М. Л. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / Под ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. Мн., 2013.
7. Клименко С. А., Мельничук Ю. О., Встовський Г. В. Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту. К., 2009.
9. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. М., 2014.
10. Запорожец В. В. // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 4. С. 602–609.

S. A. KLIMENKO, A. G. KOLMAKOV, V. Ya. LEBEDEV, V. I. BORODAVKO

INHERITANCE AND TECHNOLOGICAL ASSURANCE OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF PRODUCTS WITH COATINGS

Summary

The results of studies on technological assurance and performance properties of machine parts with weld and spray-coating are presented. It is shown that the parameters of state of the surface layer and the operational properties of coated parts, along with processing conditions, are determined by the peculiarities of the structure and properties of the deposited or sputtered material.