

5. *Жиленков А. А.* Применение нейронечёткого моделирования для задач идентификации многокритериальности в транспортной отрасли / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Вестник Самарского государственного университета путей и сообщений. — 2014. — № 1 (23). — С. 104–110.

6. *Соколов С. С.* Построение информационного обеспечения безопасной эксплуатации судна при помощи автоматизации управления размещением груза и реагирования на внештатные ситуации / С. С. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 184–190.

7. *Чёрный С. Г.* Идентификация внешних параметров сигналов для экспертных подсистем в составе устройств судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Научно-технический вестник СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2014. — № 3 (198). — С. 28–36.

8. *Ильиных А.* В России есть возможности для изготовления бурового оборудования для континентального шельфа / А. Ильиных // Тезисы выступления главного конструктора ЗАО «Уралмаш — Буровое оборудование» года на заседании рабочей группы ТПП РФ по развитию производства отечественного оборудования для работы на шельфе (<http://www.derrick.ru/?f=z&id=8407>).

9. *Чёрный С. Г.* Интеллектуальная поддержка принятия решений при оптимальном управлении для судовых электроэнергетических систем / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 68–75.

10. *Моцохейн Б. И.* Электропривод зарубежных установок для морского бурения: обзор зарубежной литературы / Б. И. Моцохейн. — М.: ВНИИОЭНГ, 1977. — 76 с.

УДК 62.2+ 67.05+67.02+629.5.03

С. Н. Безпальчук,
инж.;

А. А. Буцанец,
нач. отдела;

В. М. Петров,
д-р техн. наук, проф.

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

GENERALIZED MODEL OF THE QUALITY STATUS OF SURFACE CRITICAL PARTS OF SHIP POWER PLANTS MADE OF COMPOSITE PLASTICS

Существенное влияние на работоспособность пар трения судовых энергетических установок, отдельные тедали которых выполнены их композиционных углепластиков, оказывают параметры качества и точности, которые обеспечиваются механической обработкой. На этапах проектирования и выполнения технологического процесса важно иметь критерии позволяющие управлять эксплуатационными параметрами трибосопряжения. В статье приведена обобщенная модель качества состояния поверхностного слоя деталей пар трения из композитов. Данная модель включает параметры: микрогеометрии поверхности, геометрической точности, технологических остаточных напряжений и упругопластической деформации. Для определения технологических остаточных напряжений предложен метод вдавливания алмазного индентора в поверхностный слой, где по диаграмме внедрения алмазного наконечника на различных участках определяют упругие и пластические составляющие. Микрогеометрия поверхности определяется методом сканирования алмазным индентором.

A significant impact on the performance of the friction pairs of ship power plants, separate tadali which is made of composite plastics, render settings quality of and accuracy, which are provided by machining. During the design and implementation process it is important to have criteria allows you to manage service-tion parameters of the friction

pair. The article presents a generic model of the quality status of the surface layer of the friction pairs of composites. This model includes the parameters: micro-surface geometry, geometric accuracy, technological residual stresses and elastic hopelessly deformation. To determine the technological residual stresses method of indentation diamond indenter into the surface layer, where on the chart the introduction of the diamond tip at different sites to determine the elastic and plastic components. Microgame-ry of the surface is determined by scanning a diamond indenter.

Ключевые слова: судостроение, качество поверхности, параметры микрогеометрии, точность формы, композиционные углепластики, ресурс, надежность сопряжений.

Key words: shipbuilding, surface quality, the parameters of the microgeometry, precision molds, composite plastics, resource, reliability mates.

НАИБОЛЕЕ перспективными материалами триботехнического назначения, созданными специально для работающих в воде нагруженных дейдвудных подшипников скольжения, являются композитные реактопласты, армированные угольными волокнами. Данные материалы обладают высокими эксплуатационными свойствами и имеют длительный ресурс по сравнению с металлами и их сплавами. Требования к антифрикционным характеристикам материалов определяются условиями эксплуатации работающих в воде узлов трения: контактным давлением и скоростью скольжения, материалом контртела, температурой воды, а также параметрами качества поверхностного функционального слоя деталей, подверженных механической обработке с удалением слоя материала

Одной из важнейших задач трибологии является комплексное количественное сравнение состояния поверхностного слоя изделий из композиционных углепластиков, полученных после применения различных видов механической обработки и после эксплуатации при трении [1]. Это состояние, зависит от большого числа факторов, которые имеют различную физическую природу. Из приведенных характеристик микрогеометрии и шероховатости применительно к формированию эксплуатационных свойств поверхностного слоя изделий наиболее информативными являются опорная линия и функция распределения ординат профиля [2], [3], упругопластические и реологические характеристики [3], [4]. Данный комплексный подход был предложен Д. В. Васильковым [2], [3] и далее развит применительно к трибосопряжениям в совместных работах [1], [5], [6].

Опорная линия $t_p(y)$ и функция распределения ординат $P(y)$ является функциями высоты микронеровностей y , которая изменяется от нуля на поверхности до R_{\max} в глубину. При сопоставлении профилей целесообразно перейти от физической координаты y к относительной координате $\phi = y/R_{\max}$. Упругопластические и реологические характеристики могут быть представлены тремя функциями: упругость $U(h)$, пластичность $L(h)$, ползучесть $R(h)$. Распределение указанных характеристик по глубине h аналогично микрогеометрии также целесообразно привести к безразмерному виду путем введения относительной координаты $\chi = h/h_{\max}$. Принятые относительные координаты ϕ и χ изменяются в интервале значений от нуля до единицы. Это дает основание использовать обобщенную относительную координату ζ глубины поверхностного слоя, изменяющуюся от нуля до единицы и отображающую координаты ϕ и χ .

Таким образом, можно сформировать обобщенную функциональную модель состояния поверхностного слоя изделия, включающую пять основных функций: $t_p(\zeta)$, $P(\zeta)$, $U(\zeta)$, $R(\zeta)$, $L(\zeta)$. Данная модель является *открытой*. Это означает, что она может быть дополнена другими функциями относительных координат, отображающими соответствующие свойства поверхностного слоя. При наличии этих основных функций можно восстановить все необходимые параметры микрогеометрии поверхности и напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя. Применительно к задаче сравнения состояния поверхностного слоя изделий из композиционных углепластиков данные функции являются таблично заданными, полученными в результате непосредственных измерений. Для сравнения и последующих вычислений целесообразно аппроксимировать их целыми рациональными функциями. Проанализировав характер изменения этих функций, отметим, что все они являются монотонными. По результатам многочисленных экспе-

риментов, представленных в работах [1], [3] опорная линия $t_p(\zeta)$ и функция распределения ординат профиля $P(\zeta)$ могут быть представлены гладкой кривой с одной точкой перегиба (рис. 1). Функции такого вида хорошо аппроксимируются полиномом третьей степени:

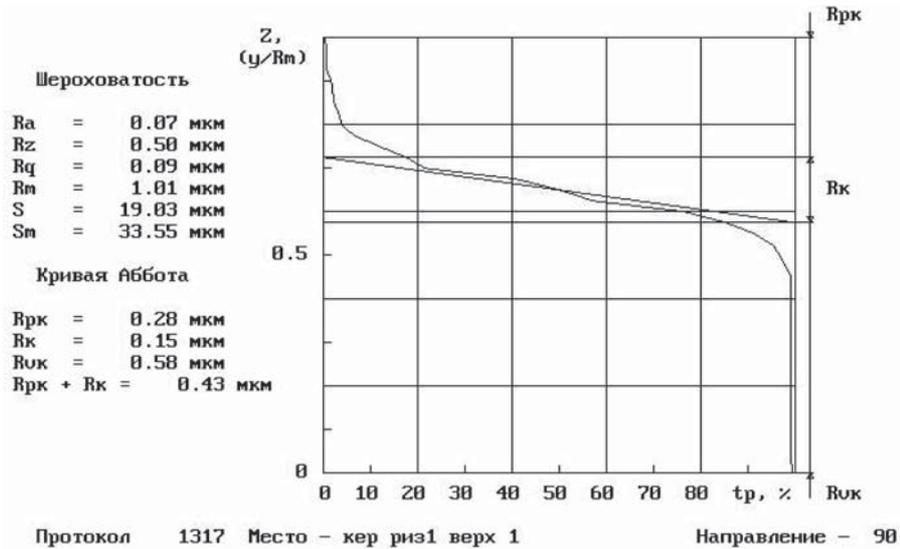
$$f(\zeta) = a_1 + a_2\zeta + a_3\zeta^2 + a_4\zeta^3, \quad (1)$$

где a_k ; $k = 1, \dots, 4$ — коэффициенты полинома.

Определение коэффициентов аппроксимирующей функции (1) осуществляется путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} c_1a_1 + c_2a_2 + c_3a_3 + c_4a_4 &= d_1; \\ c_2a_1 + c_3a_2 + c_4a_3 + c_5a_4 &= d_2; \\ c_3a_1 + c_4a_2 + c_5a_3 + c_6a_4 &= d_3; \\ c_4a_1 + c_5a_2 + c_6a_3 + c_7a_4 &= d_4, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $c_j = \sum_{i=1}^N \zeta_i^{j-1}$, $j = 1, \dots, 7$; $d_k = \sum_{i=1}^N \zeta_i^{j-1} f(\zeta_i)$, $k = 1, \dots, 4$; N — число отсчетов таблично заданной функции $f(\zeta)$.



Протокол 1317 Место – кер риз1 верх 1 Направление – 90

Рис. 1. Опорная кривая (шероховатости стандарт DIN 4776) t_p и кривая Аббота, определяющие основные эксплуатационные характеристики поверхности

Упругость $U(\zeta)$, ползучесть $R(\zeta)$ и пластичность $L(\zeta)$ формируются на основе силовой диаграммы внедрения алмазного индентора, при измерении микротвердости, приведенной на рис. 2 [4], [7] – [9]. Здесь упругость определяется участком OA диаграммы, ползучесть — участком AB , а пластичность — участком BC . Данные характеристики в пределах малых глубин внедрения индентора изменяются практически линейно. Поэтому они аппроксимируются линейными функциями, которые можно получить из формулы (1) при $a_3 = a_4 = 0$.

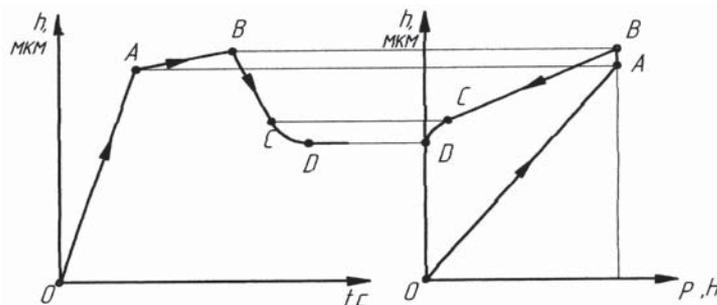


Рис. 2. Диаграммы внедрения алмазного индентора в поверхностный слой исследуемого композиционного материала после механической обработки

На основе ранее изложенного, уравнения, описывающие обобщенную функциональную модель состояния поверхностного слоя рассматриваемых изделий, можно представить в виде системы уравнений следующего вида [10]:

$$\left. \begin{aligned} t_p(\zeta) &= a_{1,1} + a_{1,2}\zeta + a_{1,3}\zeta^2 + a_{1,4}\zeta^3; \\ P(\zeta) &= a_{2,1} + a_{2,2}\zeta + a_{2,3}\zeta^2 + a_{2,4}\zeta^3; \\ U(\zeta) &= a_{3,1} + a_{3,2}\zeta; \\ R(\zeta) &= a_{4,1} + a_{4,2}\zeta; \\ L(\zeta) &= a_{5,1} + a_{5,2}\zeta; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где a_{ij} — коэффициенты аппроксимирующих функций, $i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 4$.

Систему уравнений (3) целесообразно представить в матричном виде. Для этого введем в рассмотрение вектор состояния $R(\zeta)$, компонентами которого являются соответствующие функции модели состояния поверхностного слоя $R(\zeta) = [t_p(\zeta), P(\zeta), U(\zeta), R(\zeta), L(\zeta)]^T$.

Вектор состояния поверхностного слоя с учетом системы (3) можно записать в матричном виде:

$$R(\zeta) = A \cdot Z(\zeta), \quad (4)$$

где A — (5×4) — матрица коэффициентов a аппроксимирующих функций; $Z(\zeta) = [1, \zeta, \zeta^2, \zeta^3]^T$ — (4×1) — вектор.

На базе построенных моделей (4) состояния поверхностного слоя изделия рассмотрим три обобщенных критерия F качества: $F_I(\zeta)$, $F_{II}(\zeta)$ в виде функции и $F_{III}(\zeta)$ в виде функционала. Первым критерием $F_I(\zeta)$ качества поверхностного слоя является функция

$$F_I(\zeta) = F(\zeta) = M^T \cdot R(\zeta), \quad (5)$$

где M — (5×1) — вектор размерно-весовых коэффициентов, компоненты m_j которого определяются из выражения; $m_j = \mu_j \cdot \nu_j$; $j = 1, \dots, 5$; μ_j — коэффициенты приведения j -й функции состояния поверхностного слоя к безразмерному виду; ν_j — весовой коэффициент влияния j -й функции состояния поверхностного слоя на критерии качества применительно к данным функциональным свойствам (износостойкость, усталостная прочность и др.), величина которого определяется на основе эвристических оценок (по данным теоретических и экспериментальных исследований).

С учетом (4) критерий $F(\zeta)$ в функции (5) преобразуется к виду

$$F(\zeta) = M^T \cdot A \cdot Z(\zeta). \quad (6)$$

Второй критерий $F_{II}(\zeta) = D(\zeta)$ качества поверхностного слоя является также функцией от носительной координаты ζ и определяется как производная от критерия $F(\zeta)$ по этой координате:

$$D(\zeta) = M^T \cdot A' \cdot G \cdot Z'(\zeta), \quad (7)$$

где A' — (5×3) — матрица коэффициентов аппроксимирующих функций, получаемая из матрицы A вычеркиванием первого столбца; G — (3×3) — диагональная матрица коэффициентов со следующими отличными от нуля элементами $g_{i,j} = j$, $j = 1, \dots, 3$, где $Z'(\zeta)$ — (3×1) — вектор, получаемый из вектора $Z(\zeta)$ вычеркиванием последнего компонента.

Интегральный критерий $F_{III}(\zeta) = J$ качества поверхностного слоя является функционалом, скаляризирующим вектор состояния $R(\zeta)$ по глубине поверхностного слоя. Он получается интегрированием критерия $F(\zeta)$ по этой координате $\zeta \in [0, 1]$:

$$J = M^T \cdot A \cdot E \cdot I, \quad (8)$$

где E — (4×4) — диагональная матрица коэффициентов со следующими отличными от нуля, элементами $e_{i,j} = 1/j$, $j = 1, \dots, 4$, где I — (4×1) — единичный вектор, $i_j = 1$.

Полученные в выражениях (6) – (8) функции, описывающие критерии качества являются основой для комплексной оценки состояния поверхностного слоя изделий. При отработке новых технологий и непосредственном контроле состояния поверхностного слоя возникает необходимость оценки невязки по критериям качества. Степень близости критериев качества поверхностей

различных изделий к нормативным значениям будем определять с помощью равномерной и квадратичной метрики [3]. Равномерная метрика представляет собой выражения вида:

$$\left. \begin{aligned} \rho_p(F^{(1)}, F^{(2)}) &= \int_0^1 [F^{(2)} - F^{(1)}] d\zeta; \\ \rho_p(D^{(1)}, D^{(2)}) &= \int_0^1 [D^{(2)} - D^{(1)}] d\zeta; \\ \rho_p(J^{(1)}, J^{(2)}) &= J^{(2)} - J^{(1)}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $F^{(1)}, F^{(2)}, D^{(1)}, D^{(2)}, J^{(1)}, J^{(2)}$ — F -критерии качества двух сравниваемых поверхностей.

Квадратичная метрика представляет собой выражения, аналогичные (9), и имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \rho_k(F^{(1)}, F^{(2)}) &= \int_0^1 [F^{(2)} - F^{(1)}]^2 d\zeta; \\ \rho_k(D^{(1)}, D^{(2)}) &= \int_0^1 [D^{(2)} - D^{(1)}]^2 d\zeta; \\ \rho_k(J^{(1)}, J^{(2)}) &= [J^{(2)} - J^{(1)}]^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Равномерные метрики являются знакозависимыми. Они определяют не только расстояние между критериями, но и направление отклонений. Квадратичные метрики предпочтительнее применять в случаях, когда необходимо оценить только величины отклонений между критериями. На основе равномерных (9) и квадратичных (10) метрик можно сопоставить ряд технологических процессов, образующих некоторое множество. Расстояние между критериями позволяют выявить эквивалентные технологические процессы, а также выбрать технологии и режимы, приводящие к требуемому улучшению состояния поверхностного слоя.

Предложенная обобщенная функциональная модель состояния поверхностного слоя изделия, выполненного из композиционного углепластика, позволяет инвариантно сопоставить его различные характеристики и комплексно оценить эксплуатационные свойства исследуемых поверхностей после механической обработки и поверхностей трения.

Представленная обобщенная модель качества и детально разработанные алгоритмы [10] на базе современных измерительно-вычислительных комплексов, позволяют синтезировать рациональную по условиям эксплуатации изделий из композиционных материалов микрогеометрию поверхности, а также уровень технологических остаточных напряжений в механически обработанном материале поверхностного функционального слоя. При выполнении оптимизационных процедур можно получить и реализовать в рамках эффективных алгоритмов оценки параметрических характеристик и характеристик микрогеометрии по стандарту DIN 4776 [3].

Список литературы

1. Васильков Д. В. Обеспечение стабильности качества поверхностного слоя изделий при механической обработке на основе оптимизационного проектирования / Д. В. Васильков, А. В. Валетов, А. Е. Кочура, В. М. Петров // Межвуз. сб. науч. тр. — Вып. 11. — СПб.: СЗПИ, 1998. — С. 78–83.
2. Васильков Д. В. Теория и практика оптимизационного проектирования механической обработки маложестких заготовок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Д. В. Васильков. — Государственный технический университет (ГТУ). — СПб., 1997. — 426 с.
3. Васильков Д. В. Динамика технологической системы при обработке маложестких заготовок / Д. В. Васильков, В. Л. Вейц, П. А. Лончих. — Иркутск: Иркут. ун-т, 1994. — 98 с.

4. *Петров В. М.* Повышение эффективности обработки лезвийным инструментом на основе учета физико-механических характеристик материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / В. М. Петров. — ПИМАШ. — СПб., 1995. — 224 с.

5. *Петров В. М.* Оценка шероховатости точеной поверхности деталей выполненных из композиционных углепластиков / В. М. Петров // Междунард. науч.-практ. конф. «Качество поверхностного слоя деталей машин». — СПб., 24–26 июня 2003. — С. 138–143.

6. *Петров В. М.* Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач / В. М. Петров. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 282 с.

7. *Петров В. М.* Исследование упруго-пластических характеристик поверхностного слоя материалов методов микротвердости / В. М. Петров, Д. В. Васильков // Межвуз. сб. науч. тр. — Вып 1. — СПб: СЗПИ, 1995. — С. 99–109.

8. *Петров В. М.* Новый автоматизированный комплекс измерения микротвердости и других физико-механических параметров поверхностного слоя деталей машин / В. М. Петров // Динамика виброактивных систем // Межвуз. сб. науч. тр. — Иркутск: Иркут. ун-т, 1994. — С. 37–46.

9. *Абозин И. Ю.* Некоторые вопросы механической лезвийной обработки углепластиков / И. Ю. Абозин, В. М. Петров // Вопросы материаловедения: науч.-техн. журнал. — 2001. — № 2 (26). — С. 86–93.

10. *Петров В. М.* Управление процессами контактного взаимодействия элементов трибосопряжения машин и технологических систем путем применения активных сред: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / В. М. Петров. — ПИМАШ. — СПб., 2004. — 335 с.