

УДК 621.923.42

Я.В. Жарий, канд. техн. наук

Г.А. Веремей, ст. преподаватель

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ДЕФЕКТАЦИИ СЕДЕЛ КЛАПАНОВ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМ РЕМОНТЕ

Я.В. Жарій, канд. техн. наук

Г.О. Веремей, старш. викладач

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДЕФЕКТАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ СІДЕЛ КЛАПАНІВ У ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОМУ МЕХАНІЗМІ

Yadviga Zhariy, PhD in Technical Sciences

Gennadiy Veremei, senior teacher

Chernigov National Technological University, Chernigov, Ukraine

THE MATHEMATICAL MODEL FOR THE FLAW DETECTING PROCESS OF THE OVERHAULED VALVE-SEAT SURFACES IN THE VALVE TIMING GEAR

Разработана математическая модель, позволяющая определить и описать степень износа рабочих поверхностей седла клапана с целью получения объективных результатов по дефектации для принятия решения о целесообразности проведения восстановительного ремонта и снижения его трудоёмкости.

Ключевые слова: *формообразующие параметры, поверхность переменного профиля, интерполяционная схема, трехмерный анализ, двухмерный анализ, численные методы, процесс дефектации.*

Rozrobлено математичну модель, яка дозволяє визначити та описати ступінь зносу робочих поверхонь сідла клапана з метою отримання об'єктивних результатів з дефектації для прийняття рішення про доцільність виконання ремонту по відновленню і зниженню його трудомісткості.

Ключові слова: *формууючі параметри, поверхня змінного профілю, інтерполяційна схема, тривимірний аналіз, двомірний аналіз, численні методи, процес дефектації.*

The mathematical model to determine and describe the degree of the overhauled valve-seat surfaces' deterioration in the valve timing gear has been proposed. This model was made to obtain the incorrect results for the deterioration to make decision of necessity to carry out the overhaul and decreasing of complexity.

Key words: *the forming parameters, the surface of the variable profile, the interpolated scheme, three-dimensional analysis, two-dimensional analysis, the numerical methods, flaw detection.*

Постановка проблемы. В ремонтном производстве газораспределительных механизмов (ГРМ) головок блоков двигателей обработке изношенных сёдел клапанов предшествует процесс их дефектации с целью выявления степени износа рабочих поверхностей и принятия решения о проведении восстановительного ремонта или выбраковывании неподлежащих восстановлению сёдел. Важность задачи по получению объективных результатов дефектации сёдел клапанов обусловлена увеличением трудоёмкости восстановительного ремонта в случае ошибочно поставленного диагноза (особенно, если износ поверхностей неравномерный и имеет нестандартные локальные области в результате прогара или критического износа). Ошибочность таких результатов приводит к необходимости введения дополнительных операций по выпрессовке изношенного и запрессовке нового седла в головке блока двигателя, что увеличивает трудоёмкость восстановительного ремонта в несколько раз и является экономически неэффективным.

На основании вышеизложенного вопрос проведения объективно-оптимальной дефектации с точки зрения оценки степени износа рабочих поверхностей сёдел клапанов является достаточно актуальным.

Анализ исследований и публикаций. Исследования информационных источников [2; 3; 9] показывают, что на сегодня в данной области ремонтного производства ГРМ не обнаружено совершенных методов и математических моделей геометризации изношенных внутренних конических поверхностей со сложной топографией, которые позволяют описать степень их износа.

Как показывают практические исследования, наиболее распространёнными в ремонтном производстве являются органолептические методы определения степени износа седел, однако они малоэффективны, поскольку дают необъективную оценку истинному состоянию изношенных деталей.

Цель статьи. Разработать математическую модель, позволяющую определить и описать степень износа рабочих поверхностей седла клапана с целью получения объективных результатов по дефектации для принятия решения о целесообразности восстановительного ремонта и снижения его трудоёмкости.

Изложение основного материала. Как показывают исследования отечественных и зарубежных источников информации, наиболее распространёнными техническими отклонениями при работе автомобильных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) являются дефекты головок блока цилиндров, связанные с износом клапанных седел (по статистике – до 83 % отечественных и до 64 % зарубежных) [9].

В восстановительном ремонте клапанных седел конечной важнейшей задачей является обеспечение герметичности сопряжения «клапан-седло» за счёт их правильной геометрии поверхностей контакта. Это требует принятия решения о целесообразности проведения такого ремонта путём определения «неправильной геометрии» рабочих поверхностей клапана поверхности в процессе дефектации. При этом цель дефектации – оценить объективное техническое состояние детали с последующим её включением в группу деталей, пригодных для ремонта, или исключением из неё.

Традиционно в процессе дефектации изношенных седел, используемые органолептические методы, как показывают практические исследования, носят субъективный характер и не позволяют сделать окончательный вывод о состоянии детали. Определить степень износа седел клапанов, а также возможность их восстановительного ремонта для дальнейшего применения в ГРМ автомобиля позволяет контрольный этап процесса дефектации посредством:

- снятия внутренних размеров каждого седла с помощью профилометра [6; 8];
- описания геометрической формы рабочих поверхностей детали с использованием математической модели;
- расчета отклонений фактических показателей от предельно допустимых размеров седла, пригодного для использования.

Полученные и обработанные профилограммы используются для оценки геометрических параметров поверхностей в виде макро- и микронеровностей разными методами [4; 7; 10].

В данной задаче макроотклонения не представляют интерес и для выбора методов распознавания степени износа седла клапана будет рассматриваться топография поверхности с точки зрения микрогеометрии.

За основные микрогеометрические параметры поверхности, характеризующие ее качества, принимаем шероховатость и волнистость с условной границей различия между ними в зависимости от используемой базовой длины L .

Поскольку в данной задаче математически неровности изношенного седла клапана можно считать волнистостью, для исследования особенностей геометрии рассматриваемой поверхности будем использовать профилограммы с применением методов 2D- и 3D-моделирования. При двухмерном моделировании рассмотрим продольные и поперечные профили.

Продольный профиль – это сечение поверхности вертикальной плоскостью, проходящей через ось седла клапана с ориентацией в заданном направлении. Тогда основными стандартными параметрами волнистости профиля, которые целесообразно использовать в процессе дефектации клапанного седла, являются следующие [7; 11].

1. Наибольший размах профиля W_z (расстояние между линией выступов и линией впадин) может определяться по десяти точкам:

$$W_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{l=1}^5 |h_{\max}| + \sum_{l=1}^5 |h_{\min}| \right] \quad (1)$$

или по формуле:

$$W_z = W_p + W_v,$$

где W_p – наивысшая вершина профиля; W_v – глубочайшая впадина профиля.

При этом линией выступов профиля принято называть линию, эквидистантную средней линии и проходящую через высшую точку профиля в пределах базовой длины L . Линию, эквидистантную средней линии профиля и проходящую через низшую точку профиля в пределах базовой длины, называют линией впадин профиля.

2. Тотальная высота профиля – это разность максимальной и минимальной абсолютной высоты профиля на протяжении всей длины трассы T :

$$W_t = \underset{x \in T}{\text{MAX}}(h(x)) - \underset{x \in T}{\text{MIN}}(h(x)). \quad (2)$$

3. Среднеарифметическое отклонение волнистого профиля в абсолютных значениях в пределах базовой длины L вычисляется:

$$W_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i - h_{cp}|, \quad (3)$$

где n – число выбранных точек на базовой длине;

$|h_i - h_{cp}|$ – отклонение профиля, определяющее расстояние между точкой реального профиля и средней линией профиля. Средняя линия профиля – это базовая линия, делящая реальный профиль так, что в пределах базовой длины сумма квадратов отклонений профиля от этой линии минимальна.

4. Среднеквадратическое отклонение профиля в пределах базовой длины L :

$$W_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h_{cp})^2}. \quad (4)$$

Могут быть рассмотрены и другие шаговые и гибридные параметры профиля, однако в процессе дефектации изношенного седла потребности в этом нет. Основными параметрами, необходимыми для оценки степени износа седла клапана, являются параметры наибольших впадин для каждой фаски $W_{A \min}$, $W_{B \min}$, $W_{C \min}$ (как наиболее интенсивные гармоники в процессе износа).

При этом данные параметры необходимо настроить не на среднюю линию профиля, полученного после обработки профилограммы, а на номинальную линию – каркас номинального (допустимого) седла (в виде проекций образующих внутренних конических поверхностей) (рис. 1). Для этого при расчете приведенных выше параметров, особенно при установке базовой длины, необходимо настраивать L на размеры (абсциссы) фасок L_A, L_B, L_C с тем, чтобы ординаты наибольших впадин в системе координат XOH вычислять для каждой фаски:

$$W_{A \min} = \underset{x \in L_A}{\text{MIN}}(h(x)), \quad W_{B \min} = \underset{x \in L_B}{\text{MIN}}(h(x)), \quad W_{C \min} = \underset{x \in L_C}{\text{MIN}}(h(x)) \quad (5)$$

с обязательной фиксацией абсцисс в этих точках (x_A, x_B, x_C).

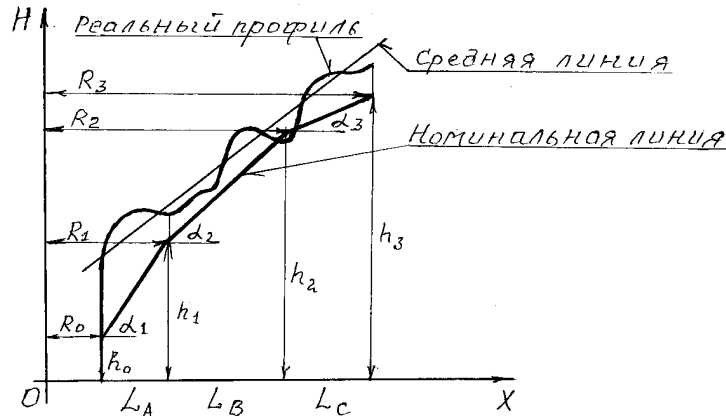


Рис. 1. Продольный профиль изношенного седла клапана

Тогда для заданных размеров номинального (допустимого) седла h_0, R_0, R_1, R_2, R_3 и углов наклона образующих конических поверхностей $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ относительно оси OX можно построить уравнения трех прямых допустимого каркаса седла в общем виде $h = h(x)$:

- для фаски А – $h(x) = h_0 + (x - R_0) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)$,
- для фаски В – $h(x) = h_0 + (R_1 - R_0) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) + (x - R_1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)$,
- для фаски С – $h(x) = h_0 + (R_1 - R_0) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1) + (R_2 - R_1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2) + (x - R_2) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_3)$.

Подставляя абсциссы x_A, x_B, x_C наибольших впадин профиля в уравнения (6), получаем значения $h_A = h(x_A)$, $h_B = h(x_B)$, $h_C = h(x_C)$, как критерии, для сравнения их со значениями с профиля $W_{A \min}, W_{B \min}, W_{C \min}$.

Если хотя бы для одной из фасок седла (особенно В) выполняется условие:

$$W_{A \min} < h_A, W_{B \min} < h_B, W_{C \min} < h_C, \quad (7)$$

седло считается изношенным и принимается решение о нецелесообразности его ремонта.

Если условие (7) не выполняется на рассматриваемом профиле, для более полного заключения об износе седла клапана обрабатывается множество профилограмм. Чтобы выбрать оптимальное их количество, необходимо делать правильный подбор ориентации продольных профилей, возможно даже с использованием методов неразрушающего контроля материалов (например, пенетрации).

Если по высоте износа седло пригодно для ремонта, в процессе дефектации необходимо исследовать и «ширину» износа с использованием, например, круглограмм. Тогда второй этап 2D-анализа поперечного профиля седла клапана позволяет рассчитать возможный радиальный износ его фасок.

Для численного анализа степени отклонения от некруглости фасок изношенной детали могут быть использованы методы нелинейной регрессии [5] с расчетом отклонений всех точек кривой поперечного профиля (кругового сечения) от номинальной окружности.

Однако в процессе дефектации для распознавания радиального износа седла достаточно исследовать только максимальные отклонения радиусов изношенных фасок от предельно допустимых радиусов. Поэтому предлагается использовать фрагментарный подход [1] – построением вспомогательных описанных окружностей.

Путем перебора или с помощью функций [5] на профильной кривой выбираются три точки, максимально удаленные от центра $O(x_0, y_0)$ и лежащие в разных квадрантах системы координат XOY (рис. 2). Строится внешняя описанная окружность, для вычисления радиуса $R_{k \max}$ которой можно использовать теоремы синусов и косинусов [1] для

треугольника, составленного из выбранных точек $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$, $A_3(x_3, y_3)$. Тогда максимальный радиус износа можно рассчитать по формулам:

$$R_{k\max} = \frac{a_3}{\sqrt{1 - \cos^2(\gamma)}}, \quad \cos(\gamma) = \frac{a_1^2 + a_2^2 - a_3^2}{2ab}, \quad (8)$$

где $a_1 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$; $a_2 = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}$; $a_3 = \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$.

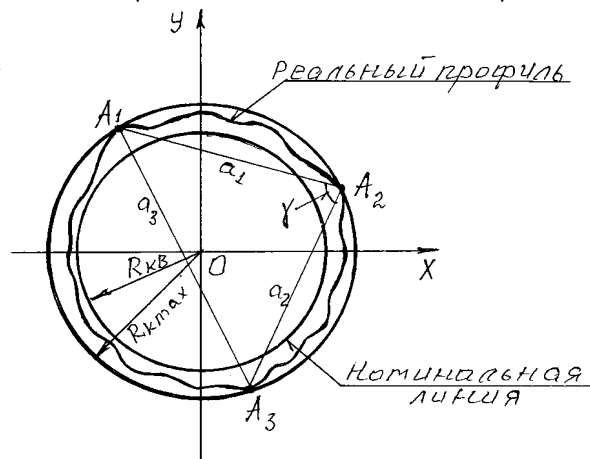


Рис. 2. Поперечный профиль изношенного седла клапана

Далее необходимо определить, какой из фасок (А, В, С) принадлежит обрабатываемая круглограмма (уровня h_k) в единой с профилем системе координат XOY :

- фаске А, если $h_0 \leq h_{kA} \leq h_1$, где $h_1 = h_0 + (R_1 - R_0) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1)$,
- фаске В, если $h_1 < h_{kB} \leq h_2$, где $h_2 = h_1 + (R_2 - R_1) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2)$,
- фаске С, если $h_2 < h_{kC} \leq h_3$, где $h_3 = h_2 + (R_3 - R_2) \cdot \operatorname{tg}(\alpha_3)$.

Тогда с учетом формул (9) можно определить номинальный (допустимый) радиус износа конической поверхности седла для уровня h_k :

- для фаски А – $R_{kA} = R_0 + (h_{kA} - h_0) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_1)$,
- для фаски В – $R_{kB} = R_1 + (h_{kB} - h_1) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_2)$,
- для фаски С – $R_{kC} = R_2 + (h_{kC} - h_2) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha_3)$.

Используя для текущей обрабатываемой профильной кривой номинальный (допустимый) радиус для соответствующей фаски (R_{kA}, R_{kB}, R_{kC}), сравниваем его с $R_{k\max}$ – максимальным радиусом профильной кривой. Если $R_{k\max}$ больше номинального радиуса, то делаем выводы о целесообразности ремонта седла (особенно для фаски В).

Как и в случае с продольными профилями, для более полного заключения об износе седла клапана необходима оцифровка множества круглограмм с избавлением от случайных шумов и последующей обработкой в вычислительной среде.

Возможны ситуации, когда чрезмерный радиальный износ седла клапана может быть скорректирован за счет умеренного «глубинного» износа посредством ремонта детали, что требует перехода на единую систему координат и 3D-моделирование с помощью вычислительных средств.

При этом большинство программных средств для численного трехмерного анализа требуют равномерной прямоугольной сети точек x_i, y_j ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$) с покоординатной их увязкой с третьей координатой. В данном случае массив исходных данных после оцифровки профилограмм не может быть получен с равномерным шагом по осям

OX и OY , поскольку при исследовании тел вращения целесообразнее использовать продольные профили, проходящие через ось OZ .

Поэтому в задаче дефектации сложной топографии седла клапана лучше рассмотреть 3D-модель в аналитической форме в виде обобщенного полинома [1], который является универсальным для дальнейшего численного или графического анализа:

$$z = Q(x, y) = \sum_{k=1}^n c_k \cdot \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}, \quad (11)$$

где x_k, y_k ($k = 1, \dots, n$) – система точек, полученных путем оцифровки профилограмм с любым шагом, необходимым для учета неровностей обрабатываемой поверхности;

c_1, c_2, \dots, c_n – коэффициенты, определяемые из системы линейных уравнений с помощью функций системы MathCAD [5].

Пространственную модель (11) с помощью компьютерных средств удобно использовать для анализа степени износа рабочих поверхностей седла, особенно для распознавания участков максимального износа. Для этого исследуются экстремумы (минимумы) 3D-модели поверхности для каждой из фасок (A, B, C) по произвольным (или заданным пользователем) точкам с применением функций MathCAD:

$$\begin{aligned} Q_A &= \min[Q(x_i, y_i)], \quad i = 1, \dots, m_A, \quad (x_i, y_i) \in S_A, \\ Q_B &= \min[Q(x_i, y_i)], \quad i = 1, \dots, m_B, \quad (x_i, y_i) \in S_B, \\ Q_C &= \min[Q(x_i, y_i)], \quad i = 1, \dots, m_C, \quad (x_i, y_i) \in S_C, \end{aligned} \quad (12)$$

где S_A, S_B, S_C – горизонтальные проекции конических поверхностей фасок.

На найденных точках минимумов $(x_A, y_A), (x_B, y_B), (x_C, y_C)$ модели поверхности для каждой фаски могут быть вычислены значения номинальной (допустимой) поверхности, исходя из общего уравнения прямого кругового конуса:

$$Z_A = p_A \cdot \sqrt{x_A^2 + y_A^2}, \quad Z_B = p_B \cdot \sqrt{x_B^2 + y_B^2}, \quad Z_C = p_C \cdot \sqrt{x_C^2 + y_C^2}, \quad (13)$$

где p_A, p_B, p_C – параметры, определяемые для предельного размера каждой из фасок седла клапана с учетом высот h_0, h_1, h_2, h_3 (рис. 1):

$$p_A = \frac{(R_1 - R_0) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{R_1}, \quad p_B = \frac{(R_2 - R_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_2}{R_1}, \quad p_C = \frac{(R_3 - R_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha_3}{R_2}. \quad (14)$$

Тогда решение о выбраковывании седла, как невозстановливаемого, может быть принято при обнаружении более глубоких, чем Z_A, Z_B, Z_C , впадин на исходной поверхности хотя бы для одной из фасок седла (A, B, C), т. е. когда $Q_A < Z_A$, или $Q_B < Z_B$, или $Q_C < Z_C$.

Рассмотренные методы 2D- и 3D-моделирования с вычислительной точки зрения могут быть применены в процессе дефектации изношенного седла клапана, однако степень адекватности полученного результата зависит от многих факторов, особенно связанных с позиционированием и наполнением модели цифровой информацией.

С одной стороны, сама исследуемая деталь имеет сложную пространственную форму, которую с высокой точностью описать непросто (особенно по дискретным 2D-моделям), и доступ к которой для снятия показаний ограничен. С другой стороны, измерительные приборы должны быть особыми – с высокой степенью синхронизации сканирования, снятием помех и шумов, точностью оцифровки продольных и поперечных профилей и их координатной увязки.

Наиболее полную и достоверную информацию о реальной геометрии детали можно получить с помощью 3D-КИМ (координатно-измерительных машин) [7], позволяющих строить собственные системы координат номинальных поверхностей для построения их 3D-моделей, что дает возможность с высокой точностью определять отклонения реального элемента поверхности от одноименного номинального элемента.

С использованием других измерительных приборов (профилометров, кругломеров) построить достоверную модель топографической поверхности практически невозможно. Профилограммы (круглограммы) после оцифровки могут передаваться в среду трехмерного моделирования для создания базовой модели поверхности. Но для того, чтобы такая модель была адекватной реальной поверхности, необходимо увязать системы координат продольных и поперечных профилей и параметризовать модель, что является непростой задачей.

Поскольку профили поверхности, снятые при помощи профилометров, включают в себя множество шумов и погрешностей, их необходимо удалить. Этот процесс фильтрации трудоемкий, так как удаление шумов рекомендуется делать для каждого профиля отдельно. При этом целесообразно использовать прямые и обратные преобразования Фурье профилей с последующей фильтрацией (исключая самую низкую по амплитуде гармонику и получить профиль без погрешности установки), что позволяет без учета случайных ошибок анализировать все виды неровностей и отклонений реальной поверхности.

Выводы. Предложенные в данной работе математические методы и модель позволяют в процессе дефектации распознать износ рабочих поверхностей седла клапана для принятия решения о допустимости восстановительного ремонта или выбраковывании седла.

Чтобы с высокой точностью оценить степень износа поверхности седла и получить объективные результаты, необходимо обеспечить адекватный измерительный процесс.

При проведении измерений сложной топографической поверхности (особенно 2D-приборами) практически невозможно добиться абсолютного совпадения систем координат и избавиться от дополнительных погрешностей. Возникающие погрешности в измерениях и в результатах обработки возможно минимизировать только с применением 3D-КИМ и 3D-моделей.

Список использованных источников

1. *Веремей Г. А.* Математическое моделирование формообразования восстанавливаемых поверхностей седла клапана в газораспределительном механизме / Г. А. Веремей // Вісник ЧДТУ. Серія "Технічні науки" : наук. зб. – 2014. – № 1(71). – С. 127–134.
2. *Дефектация* деталей автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.irsautoyoucar.ru/car_dismantlin/142.html.
3. *Дефектация* деталей и сопряжений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://mehanik-ua.ru/lektzii-rmo/109-defektatsiya-detalej-i-sopryazhenij.html>.
4. *Дунин-Барковский И. В.* Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
5. *Дьяконов В.* MATHCAD 8/2000 : специальный справочник / В. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2000. – 592 с.
6. *Кашуба Л. А.* Геометрия реальных поверхностей деталей изделий машиностроения / Л. А. Кашуба, Д. М. Жук, В. Б. Маничев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 2. – С. 72–79.
7. *Порошин В. В.* Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей : монография / В. В. Порошин. – М., 2007. – 196 с.
8. *Профилометры* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovatosti-profilometri-profilemeri.htm>.
9. *Ремонт* головки блока цилиндров – профессионально и доступно [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.motortehn.ru/News/Message/ORR1PYA.html>.
10. *Хусу А. П.* Шероховатость поверхности (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Виттенберг, В. А. Пальмов. – М. : Наука, 1975. – 438 с.

11. *International ISO Standard 4287* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ebookspdfs.org/download/iso-4287>.