

В.Ф. Безъязычный, д.т.н.,
И.Н. Паламарь, к.т.н.
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
152934, Ярославская область, г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53)
E-mail: irina.palamar@mail.ru

Современные аспекты автоматизации научных исследований качества поверхности деталей машин с использованием методов машинного обучения

Приведена методика анализа структуры материала поверхностного слоя детали, полученного ионно-плазменным напылением, позволяющая автоматически выделять и оценивать слои по однородности дислокаций. Предложена методика оценки шероховатости поверхности на основе вероятностно-статистической классификации профилограмм, позволяющая выявлять и автоматически оценивать особенности профиля поверхности.

Ключевые слова: качество поверхности; автоматизация научных исследований; структура материала; шероховатость; машинное обучение.

V.F. Bezjazychnyi, Dr. Sc. Tech.,
I.N. Palamar, Can. Sc. Tech.
(Solovyov State Technical University of Rybinsk, 53, Pushkin Str., Rybinsk, Yaroslavl Region, 152934)

Current aspects in automation of scientific researches of machinery surface quality using machine learning methods

A procedure is shown for the analysis of material structure in the parts surface layer manufactured through ion-plasma sputtering allowing the allocation and estimate automatically layers according to dislocation uniformity. A procedure is offered for the assessment of surface roughness on the basis of probabilistic-statistic classification of Talyrond trace allowing the definition and estimate automatically the peculiarities of a surface profile.

Keywords: surface quality; scientific research automation; material structure; roughness; machine learning.

Введение

Развитие машиностроения характеризует уровень научно-технического потенциала страны и ее конкурентоспособность на мировом рынке. Промышленное производство должно обеспечивать постоянное повышение требований к эксплуатационным свойствам изделий. Задача обеспечения качества продукции особенно важна для машиностроения и авиадвигателестроения, как базовых отраслей промышленности.

В настоящее время одним из наукоемких

является производство ответственных деталей машиностроения [1]. Достижение требуемых эксплуатационных свойств непосредственно связано с научными исследованиями по применению наиболее прогрессивных технологий изготовления деталей. Особенностью современных исследований по достижению требуемых эксплуатационных свойств деталей является изучение изменений структуры материала детали в процессе обработки и анализ влияния множества различных факторов при изготовлении на требуемые показатели каче-

ства детали [2]. Особое внимание уделяется обеспечению и повышению качества поверхности ответственных деталей, что требует исследования различных свойств материала поверхностного слоя и влияния на них параметров методов обработки [3].

В современных научных исследованиях при изучении способов обработки деталей применяются методы анализа изображений структуры материала и методы искусственного интеллекта для обработки данных. Однако автоматизация таких исследований в настоящее время ограничена и связана в основном использованием компьютерной обработки данных стандартными методами или применением стандартных программ, не адаптированных под конкретные исследовательские задачи [4]. Кроме того, многие этапы исследовательской деятельности выполняются вручную. Это снижает эффективность, как конкретного исследования, так и затрудняет сравнение результатов, полученных различными исследовательскими группами.

В настоящее время результаты применения методов искусственного интеллекта и машинного обучения в обработке и анализе изображений и сигналов показывают высокую эффективность в различных областях деятельности человека. Однако уровень автоматизации решения аналогичных задач при исследовании процессов изготовления ответственных деталей позволяет сделать вывод о существовании противоречия между возможностями моделей и методов искусственного интеллекта и эффективностью их применения в машиностроении при проведении научных исследований. Основной причиной такого противоречия является высокая вариативность данных и малое их количество.

Постановка задачи и предлагаемое решение

В России качество поверхности оценивается по основным параметрам, представленным в ГОСТ 2789-73, но существует множество исследований, доказывающих то, что данных параметров недостаточно для оптимальной оценки качества поверхности, требующей комплексного подхода к анализу особенностей профиля. Повышение требований к качеству поверхности приводит к необходимости более детального изучения всех особенностей профиля шероховатости, а также переходу на уровень субшероховатости.

Актуальными являются исследования, связывающие шероховатость не только со спосо-

бами обработки, но и со структурой поверхности [2]. Международный стандарт ISO 4288:1996 предполагает рассмотрение особенностей профиля в виде цифрового сигнала и описывает использование частотного подхода для оценки геометрических параметров поверхностей. В данном стандарте предложены показатели, основанные на вычислении новых параметров структуры поверхности, по которым будет производиться дальнейшая оценка качества поверхности.

В связи с появлением в России новых стандартов ГОСТ Р ИСО 4287-2014, ГОСТ Р ИСО 25187-2-2014, идентичных международным, исследование профиля поверхности новыми методами становится все более актуальным [5, 6]. Стандарт ГОСТ Р ИСО 25187-2-2014 вводит терминологию, связанную с особенностями описания поверхности с точки зрения компьютерной обработки изображения, что требует дополнительных исследований по формированию системы показателей качества поверхности с учетом новых подходов.

Все современные исследования технологий обработки материалов и обработанной поверхности опираются на анализ изображений структур на макромасштабных, мезомасштабных и микромасштабных уровнях, поскольку исследуемые свойства деталей определяются структурой материала и поверхностного слоя.

Большой вклад в автоматизацию анализа и контроля структур материалов внесли Жизняков А.Л., Орлов А.А., Садыков С.С. Исследования Емельянова В.А., Столбова В.Ю., Клюева А.В. посвящены установлению связей параметров структуры материала с эксплуатационными свойствами деталей с применением методов искусственного интеллекта и моделей нейронных сетей. Богуслаев А.В., Олейник Ал.А., Олейник Ан.А., Павленко Д.В., Субботин С.А. исследовали применение нейросетевых моделей для автоматизации прогрессивных технологий изготовления авиационных двигателей. Однако вопросы автоматизации выявления взаимосвязи процесса анализа структуры сложного изображения материала и параметров процесса изготовления, который ее формирует, не решены.

Повышение эффективности совершенствования процессов изготовления, связанных с анализом структуры материала и поверхности ответственных деталей, требует разработки методов и средств автоматизации операций анализа и оценки параметров структуры материала и соответствующих свойств поверхно-

стного слоя деталей.

Существующие системы автоматизации научных исследований используют аналитические модели, созданные для определенных изучаемых процессов [4]. Модели представления данных, методы и алгоритмы, обеспечивающие процесс анализа структуры материала, должны гибко реагировать на особенности технологии, формирующей определенную структуру материала детали и обеспечивающей требуемые эксплуатационные свойства. Следовательно, введение в автоматизированные системы научных исследований методов искусственного интеллекта и машинного обучения является актуальным.

Автоматизация исследований структуры материала

Одним из популярных методов изменения качества поверхностного слоя является ионно-плазменная обработка. Её ключевой особенностью является уменьшение вероятности нарушения сплошности модифицированного слоя за счет нечетко выраженной границы перехода между слоями, что позволяет значительно улучшить характеристики материала, однако это усложняет количественную оценку полученного покрытия. При плазменном методе обработки отмечается корреляционная зависимость экспериментальных результатов по структурно-фазовому состоянию имплантированных образцов и данными физико-механических характеристик по глубине. В общем случае, характер перехода данных слоев описывается моделью структурно-фазовых изменений в соответствии с эффектом дальнего действия при ионной имплантации. Изображения шлифа обработанного материала имеют вариантный характер структур, а отдельные структурные элементы модели не поддаются обобщенному описанию.

Наилучшее качество покрытия достигается при большей однородности поверхностных слоев на глубине до десятков микрон. Таким образом, автоматическое определение структурно-фазового состава и его количественная оценка обеспечит объективную оценку для анализа качества покрытия в целом. Ручной расчет однородности таких структур является очень трудоемким и связан с трудностью восприятия структурной композиции сцены. При этом автоматизация процесса расчета степени однородности покрытия, полученного плазменным напылением, является актуальной задачей.

В соответствии с классической схемой, описывающей распределение отдельных структурных элементов по глубине за счет эффекта ионной имплантации, можно выделить многомасштабные представления, описывающие различные уровни детализации структуры. Их использование позволяет комплексно разделить все структурные элементы на изображении. Для анализа данного типа изображений наиболее эффективным является подход, основанный на обработке контурной структуры.

Предлагаемая многослойная модель обеспечивает формирование структуры описания изображения, позволяющей выполнить переход от общего описания изображения на многомасштабном представлении к описанию его структурного представления. Структурная модель содержит данные о характере отдельных структурных элементов и их взаимосвязях по заданным критериям, например, по геометрическим особенностям элементов.

На рис. 1 приведен результат обработки исходных изображений предложенным методом, с выделенными элементами с использованием предложенного подхода, а также график зависимости однородности дефектов и дислокаций покрытия.

Исходные изображения разделены на 3 подслоя D_1, D_2, D_3 в соответствии со степенью однородности дислокаций и дефектов. Для случаев (а) и (б) на рис. 1 можно наблюдать различный характер однородности слоев, который выявляется за счет многомасштабного представления исходных данных изображения шлифа.

Однородность в заданном срезе hs определяется по распределению отдельных элементов по формуле:

$$hs = k_n \cdot \frac{\sum_{i=1}^k Ls^{l_i}}{Ls \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k Ls_j^{el_i} / Ls_j},$$

где i – индекс для итерации структурных элементов в рамках среза; j – индекс для итерации срезов на изображении; Ls_j – общая длина среза j ; $Ls_j^{el_i}$ – длина i -го элемента el данного типа, находящегося на срезе j ; k – количество элементов el данного типа, находящихся на срезе j ; k_n – коэффициент нормирования для заданного типа элементов.

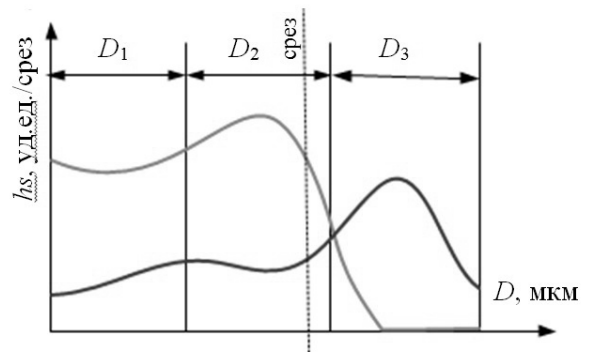
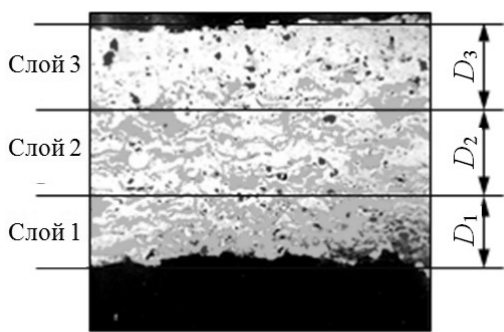
Оценка качества ионно-плазменной обработки связана с анализом структуры на различных масштабных уровнях с выделением слоев однородных элементов. Формирование

контролируемой текстуры покрытия происходит за счет варьирования плотности и энергии плазменного потока. Выделим аспекты исследования структуры материала, формируемой рассматриваемым процессом обработки:

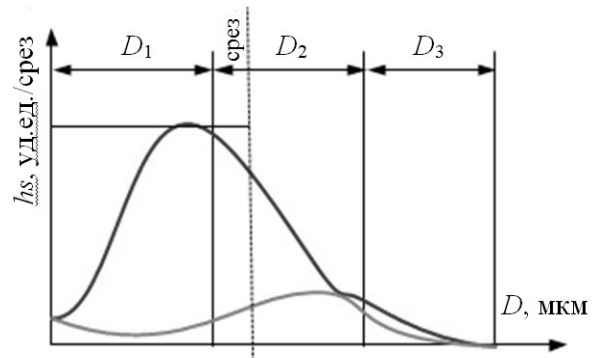
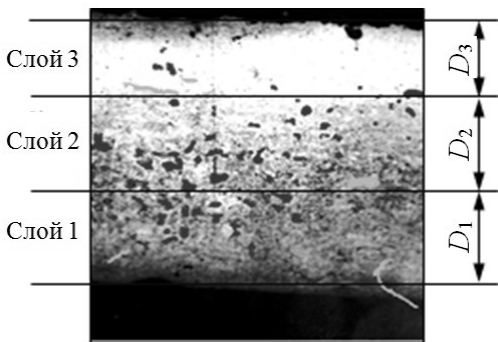
- параметры процесса: время обработки; скорость потока;
- экспертные характеристики структуры поверхностного слоя: однородность слоев; видимость слоев;
- формализация показателей структуры материала: однородность по структурным элементам на различных масштабах; толщина слоев.

Под эффективностью модели представления

растровых данных будем понимать формирование наиболее полного описания структуры, что напрямую влияет на качество анализа. В данной ситуации критерием является количество дополнительной информации для каждого сегмента растрового изображения, позволяющей управлять совокупностью сегментов для формирования объектного представления. В табл. 1 приведены результаты сравнения предложенной модели представления данных, на которой основаны разработанные методы предложенной методологии с показателями аналогов по выбранным критериям эффективности.



а)



б)

Рис. 1. Характер изменений однородности структурных элементов в зависимости от глубины покрытия

Предложенная модель организации данных в виде многослойной решетки с многомерным представлением данных повышает эффективность анализа структуры изображения для решения задач широкого класса. Наличие управляемой системы связей между структурными элементами позволяет выполнять обучение модели для различных видов структур материала и исследовать влияние параметров различных процессов обработки деталей.

Автоматизация исследований шероховатости поверхности

В процессе машинного обучения для каждого типа профиля создается своя вероятностная графовая модель, соответствующая понятию класса в задаче классификации и типу первичного профиля в задаче оценки параметров профиля. Определим тип профиля как образ, содержащий характерные, обобщенные черты первичного профиля, соответствующие

определенному виду обработки поверхности определенного материала с заданными параметрами. Для каждого типа профиля подготавливают статистическую обучающую выборку на основе набора профилограмм, преобразованных в последовательность спектральных коэффициентов длиной T . В результате профилограмма рассматривается как на-

бор $X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_t, \dots, \bar{x}_T\}$ многомерных случайных величин \bar{x}_t . Конкретная наблюдаемая последовательность $O = \{\bar{o}_1, \bar{o}_2, \dots, \bar{o}_t, \dots, \bar{o}_T\}$ является реализацией этих случайных величин, где $\bar{o}_t = \{o_1, o_2, \dots, o_{i-1}, o_n\}$ – t -ый элемент последовательности – вектор признаков, состоящий из n компонент o_i .

1. Сравнительная оценка предложенной модели по критериям эффективности

Критерий эффективности	Предложенная модель	Аналоги
Управляемость	Формирование объектов происходит за счет системы связей многослойной решетки	Объекты формируются на основе структур, выделенных по заданным критериям
Адаптивность	Возможен выбор объектного описания из множества описаний изображения за счет многослойного представления растровых данных	Обеспечиваются оптимальные параметры для решения конкретной задачи
Универсальность	Универсальность обеспечивается начальной настройкой модели для подбора оптимальных параметров анализа для заданного изображения	Выделение только заданных типов структур и обработка изображений с формированием плоской сегментной модели

Обученные для каждого класса вероятностные графовые модели являются в предложенной интерпретации моделями шероховатости и используются для определения типа первичного профиля путем классификации, то есть принятия решения о принадлежности исследуемого профиля определенному типу. Принятие решения выполняется исходя из вычисления вероятности соответствия данных профиля каждой обученной модели, и та модель, для которой эта вероятность максимальна, и считается моделью типа профиля, т. е. моделью шероховатости поверхности.

Формирование обучающей выборки с учетом различных известных показателей, позволяет установить взаимосвязи текстуры поверхности, определяемой спектром профилограммы, с эксплуатационными свойствами на основе теории машинного обучения. Обученная вероятностная графовая модель является моделью шероховатости для исследуемого процесса формирования поверхности детали, при этом точность модели определяется только параметрами обучения модели, а ее функциональные возможности задаются подготовленной обучающей выборкой.

Методика исследования профиля шероховатости и оценки его параметров в зависимости от режимов обработки или установления связей параметров профиля шероховатости со значениями эксплуатационных показателей

разработана на основе способа вероятностно-статистической классификации спектра профилограммы [7]. Процесс обработки данных состоит из 4 этапов.

Этап 1. Выполнить подготовку данных для обучения моделей. Эксперт (исследователь метода обработки) формирует набор образцов поверхности, которые по определенным признакам разделяются на типы. Для каждого типа профилей в результате машинного обучения должна быть получена модель, представляющая определенный класс. При оценке профиля шероховатости поверхности по геометрическим параметрам класс может соответствовать, например, профилограмме поверхности с определенными значениями показателей шероховатости, достигнутыми в результате гидродробеструйной обработки шариками. При оценке профиля по эксплуатационным свойствам класс может соответствовать, например, определенному значению (или диапазону значений) показателя усталостной прочности. Таким образом, совокупность показателей шероховатости является характеристикой класса. Каждому классу соответствует вероятностная модель.

Этап 2. Подготовить обучающую выборку по профилограммам поверхностей. С каждого образца поверхности из набора, соответствующего определенному экспертом типу, снимается одна или несколько профилограмм.

Профилограмма снимается любым способом, позволяющим получить сигнал, отражающий зависимость геометрии профиля поверхности от последовательности измерений (отсчетов). Каждая профилограмма преобразуется в последовательность спектральных коэффициентов.

Полученные спектрограммы профилограмм группируют по типам профиля и формируют обучающую выборку для каждой модели, соответствующей характерному профилю – классу.

Этап 3. Выполнить обучение вероятностной модели. Итеративный метод обучения состоит из следующих шагов:

1) выбор количества кластеров N . Провести инициализацию центров кластеров. Выбрать параметры β (величина обратная дисперсии) и ξ (параметр распределения Дирихле);

2) выполнить кластеризацию $C: n \times N$ и тем самым оценить значения центров кластеров $C = \{\bar{c}_j\}$, $j = 1..N$. Величина n соответствует размерности пространства признаков;

3) выполнить вычисление вероятностей переходов $A = \{a_{ij}\} : N \times N$ между центрами кластеров:

– для первого элемента последовательности ($t = 1$):

$$a_{0j} := a_{oj} + 1, \text{ если } j = v_1 = \arg \min_{u=1..N} \|\bar{c}_u - \bar{o}_1\|^2; \quad (1)$$

где \bar{c}_v – значение центра кластера с номером v ; \bar{o}_t – t -ый элемент последовательности;

– для остальных элементов последовательности ($t \neq 1$):

$$a_{ij} := a_{ij} + 1, \text{ если } i = v_{t-1} = \arg \min_{u=1..N} \|\bar{c}_u - \bar{o}_{t-1}\|^2$$

$$\text{и } j = v_t = \arg \min_{u=1..N} \|\bar{c}_u - \bar{o}_t\|^2. \quad (2)$$

Вычисление вероятностей переходов между центрами кластеров выполняется на всех последовательностях наблюдений из обучающей выборки, на тех же самых, на которых производится кластеризация.

Результатом обучения является набор моделей $M_y = (C, A, \beta, \xi)$ для каждого класса y , $y = 1..Y$, где $C = \{\bar{c}_j\}$, $j = 1..N$ – множество значений центров кластеров; $A = \{a_{ij}\}$ – множество значений, равных количеству переходов между центрами кластеров; ξ – параметр распределения Дирихле; β – параметр распределения $p(\bar{x}_t | h_t)$. Параметры ξ и β в процессе обучения не оцениваются, а подбираются эмпирически на проверочной выборке.

Этап 4. Классификация первичного профиля исследуемой поверхности. Решающее правило, т.е. сама процедура соотнесения данных к тому или иному классу, формируется путем вычисления правдоподобия модели M_y последовательности O для всех классов $y=1..Y$. Тогда модель, обладающая наибольшим значением правдоподобия, будет являться моделью класса, к которому принадлежит последовательность:

$$y^* = \arg \max_{y=1..Y} p(X = O | M_y = (C, A, \beta, \xi)). \quad (3)$$

Правдоподобие модели $M_y = (C, A, \beta, \xi)$ последовательности O вычисляется путем суммирования по всем возможным состояниям модели:

$$p(X = O | M_y) = \sum_{\forall v_t \in h, t=1..T} \lambda_{0,v_1} \cdot \mu_{v_1}(\bar{o}_1) \cdot \dots \cdot \lambda_{v_{T-1},v_T} \cdot \mu_{v_T}(\bar{o}_T), \quad (4)$$

где $\mu_j(\bar{o}_t)$ – вероятность наблюдения t -ого элемента последовательности \bar{o}_t в кластере j ; $\lambda_{i,j}$ – вероятность перехода из кластера i в кластер j .

Для экспериментального исследования предложенного метода были использованы типы профилограмм шероховатости поверхности для различных режимов обработки полотно диска ГТД, приведенные на рис. 2.

Для образцов поверхностей, профилограммы которых представлены на рис. 1, были проведены усталостные испытания и получены значения предела прочности и предела выносливости, а также замеры остаточных напряжений в материале. Для формирования классов по прочности использовались значе-

ния остаточных напряжений в поверхностном слое при различных методах обработки. Результаты классификации профиля с соответствующими параметрами шероховатости показали значения остаточных напряжений близкие к полученным в результате измерений.

Возможность анализа особенностей профиля достигается переводом профилограммы в частотную область и последующей классификацией полученной последовательности спектральных коэффициентов предложенной вероятностной моделью с малым числом параметров. Как следствие представленных результатов достигается автоматизация процесса проведения контроля и анализа качества по-

верхности, а также возможность исследования скрытых взаимосвязей между особенностями

профиля поверхности и эксплуатационными свойствами деталей.

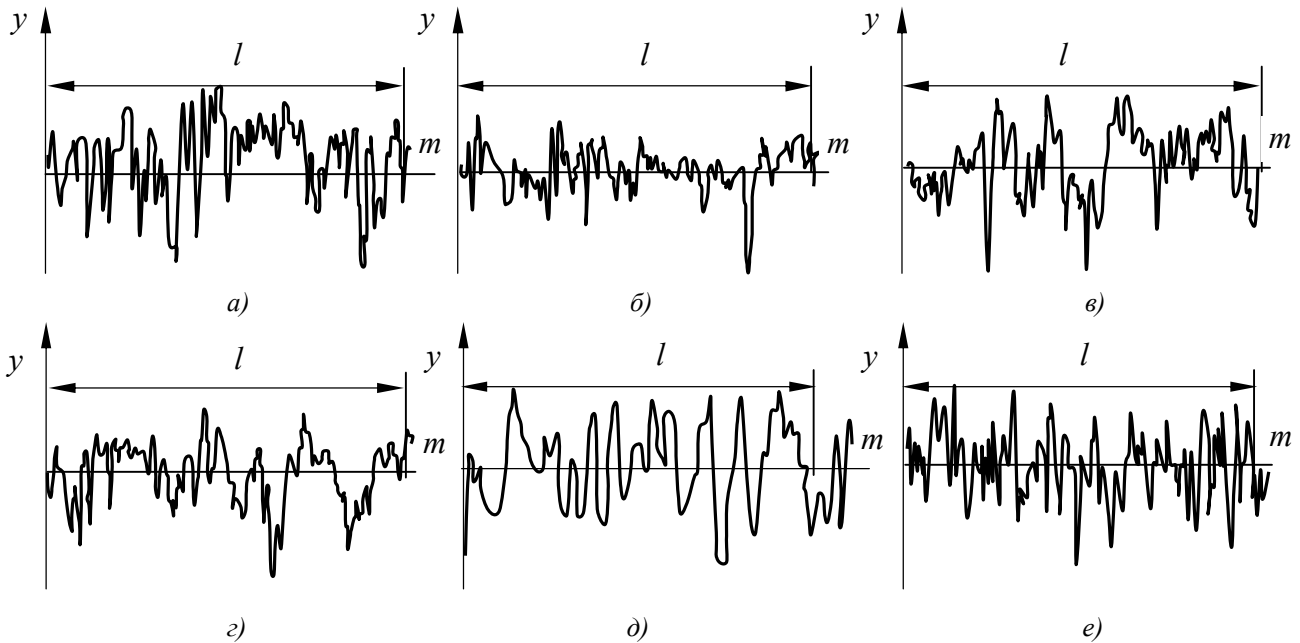


Рис. 2. Профилограммы различных типов профиля поверхности диска ГТД:

a – после эксплуатации ($Ra = 0,962$ мкм); *б* – после полировки ($Ra = 0,498$ мкм); *в* – после гидродробеструйной обработки стеклошариками ($Ra = 0,710$ мкм); *г* – после гидропескоструйной обработки ($Ra = 0,772$ мкм); *д* – после гидроабразивной обработки зерном 24A6 ($Ra = 1,014$ мкм); *е* – после абразивной обработки зерном 24A12 ($Ra = 1,692$ мкм)

Заключение

Рассмотренные методики показывают обоснованность и результативность применения методов машинного обучения для анализа и оценки параметров сложных структур материала по изображениям и для оценки качества поверхности на основе анализа шероховатости, представляемой в виде сигнала.

Объединение рассмотренных подходов к автоматизации исследований структуры материала и шероховатости поверхности на основе методов машинного обучения позволит связать исследование шероховатости с анализом структуры материала на основе общей математической модели и унифицировать процесс исследования. Предложенные модели автоматического анализа структуры материала и особенностей профиля поверхности позволяют реализовать гибкую систему научных исследований, обладающую высоким качеством адаптации к изменяющимся целям исследований новых методов обработки, эксплуатационных свойств деталей и новых материалов.

Разработка автоматизированной системы научных исследований, использующей методы анализа структуры материала и особенностей профиля поверхности на основе моделей

машинного обучения, обеспечит методологическую базу современных исследований качества поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г., Шалыгин, М.Г. Научно-технология повышения износостойкости поверхностей трения деталей машин, работающих в водородных средах // Научно-технологии в машиностроении. – 2017. – №2 (68). – С. 19-24.
2. Shalygin, M.G. Correlation between nano-roughness with grains of austenitic steel and machining quality // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2016. – Т.8. – №3S. – PP. 2835-2838.
3. Denisov, M.S. Investigation of the pressure and heat treatment effect on the ice piston blanks mechanical and structural properties from high-strength aluminum alloy B95 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – С. 12038.
4. Петрешин, Д.И., Суслов, А.Г., Федонин, О.Н., Хандожко, В.А. Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием // Научно-технологии в машиностроении. – 2019. – №8 (98). – С. 28-36.
5. ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Про-

фильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – Введ. 2014-12-12 – М.: Стандартинформ, 2019. – 24 с.

6. ГОСТ Р ИСО 25187-2-2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. – Введ. 2014-12-12. – М.: Стандартинформ, 2015. – 52 с.

7. Патент №2708500 С1 РФ, МПК G01B 21/30, G06N 7/00. Способ оценки параметров профиля поверхности на основе вероятностно-статистической классификации спектра профилограммы / И. Н.Паламарь, С. С. Юлин / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева». – № 2019102580; заявл. 30.01.2019; опубл. 09.12.2019.

REFERENCES

1. Suslov, A.G., Shalygin, M.G. Science intensive technology for friction surface wear-resistance increase in machinery operated in hydrogen environment // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.2 (68). – PP. 19-24.

2. Shalygin, M.G. Correlation between nano-roughness with grains of austenitic steel and machining quality // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2016. – Т.8. – №3S. – PP. 2835-2838.

3. Denisov, M.S. Investigation of the pressure and heat treatment effect on the ice piston blanks mechanical and structural properties from high-strength aluminum alloy B95 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – PP. 12038.

4. Petreshin, D.I., Syslov, A.G., Fedonin, O.N., Khandozhko, V.A. Automation of quality parameter control of surface layer and machinery operation properties during cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.8 (98). – PP. 28-36.

5. GOST R ISO 4287-2014. *Geometrical Product Characteristics (GPS). Surface Structure. Profile Method. Terms, Definitions and Parameters of Surface Structure*. – Introduction. 2014-12-12 – М.: Standardinform, 2019. – p. 24.

6. GOST R ISO 25187-2-2014. *Geometrical Product Characteristics (GPS). Surface Structure. Areal*. – Introduction 2014-12-12. – М.: Standardinform, 2015. – p. 52.

7. Patent No.2708500 S1 the RF, IPC G01B 21/30, G06N 7/00. *Method for Surface Profile Parameter Estimate Based on Probabilistic-Statistical Classification of Talyrond Trace Spectrum* / I.N. Palamar, S.S. Yulin / applicant and patent holder: FSBEI HE “Soloviyov Aircraft Technical University of Rybinsk”. – No.2019102580; claimed: 30.01.2019; published: 09.12.2019.

Рецензент д.т.н.
Дмитрий Иванович Петрешин

