

С. С. ДОБРОТВОРСКИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
Е. В. БАСОВА, асп., НТУ «ХПИ»

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ: ОБЗОР

Основна проблема механообробки - досягнення необхідної якості виробу. На жаль, таку характеристику якості, як шорсткість поверхні, важко гарантувати. Метою даної статті є подання різних методологій і методик, які сьогодні використовуються закордонними дослідниками для пророкування шорсткості поверхні. У роботі представлений опис кожного з підходів, з деякими перевагами й недоліками.

The general manufacturing problem can be described as the achievement of a redefined product quality with given equipment, cost and time constraints. Unfortunately, for some quality characteristics of a product such as surface roughness it is hard to ensure that these requirements will be met. This paper aims at presenting the various methodologies and practices that are being employed by foreign researchers for the prediction of surface roughness. Each approach with its advantages and disadvantages is outlined and the present and future trends are discussed.

Введение

В производственном процессе инженеры сталкиваются с двумя главными практическими задачами. Во-первых, необходимо определить значения параметров процесса, которые обеспечивают желаемое качество изделия, и, во-вторых, необходимо максимизировать системные производственные рабочие характеристики, используя доступные ресурсы. Решения, принятые инженерами-технологами, базируются не только на их опыте и компетентности, но и на характере наблюдаемых явлений, которые имеют место во время обработки.

Шероховатость поверхности – широко используемый индекс качества изделия. Достижение желаемого качества обработанной поверхности необходимо для функционального поведения изделия. С другой стороны, природа подчиненного процесса механизма образования шероховатости наряду с многочисленными неуправляемыми факторами, влияющими на соответствующие явления, делают почти невозможным прямое решение проблемы получения требуемой шероховатости. Наиболее распространенная стратегия требует выбор консервативных параметров процесса, которые и не гарантируют достижения желаемого качества поверхности, и достижение высоких производительностей съема металла [1].

Цель этой работы состоит в том, чтобы представить и обсудить различные методологии и стратегии, принятые зарубежными исследователями для прогнозирования шероховатости поверхности. Представление каждого подхода наряду с его преимуществами и недостатками должно помочь как исследователям, так и практикующим специалистам. Особое внимание в работе уделяется токарной и фрезерной обработке, поскольку они являются

наиболее распространенными процессами резания и большинство опубликованных работ посвящено им.

Шероховатость поверхности зависит от отклонения номинальной поверхности с третьего до шестого порядка. Порядок отклонения определен в международных стандартах [2]. Отклонения первого и второго порядка относятся к форме, т.е. плоскостность, округлость, и т.п., и соответственно к волнистости, и зависят от погрешности механообрабатывающего оборудования, деформации заготовки, ошибочной установки и зажиму, вибрации и неоднородности материала заготовки. Отклонения третьего и четвертого порядков относятся к периодическим: канавки, трещины и полуразрушенные состояния, которые связаны с формой и состоянием режущих кромок, стружкообразованием и кинематикой. Пятый и шестой порядки отклонений соответствуют структуре материала заготовки, которая связана с физико-химическими свойствами, действующими на зерно и размер решетки (скольжение, диффузия, окисление, остаточные напряжения и т.д.). Отклонения различных порядков накладываются друг на друга и образуют профиль шероховатости поверхности (рис. 1).

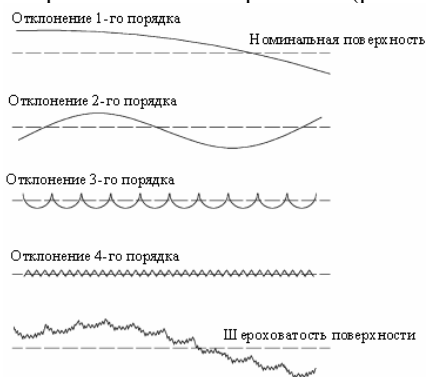


Рис. 1 – Форма отклонений поверхности

1. Классификация подходов

Классифицировать отдельные работы было нелегко из-за двух главных причин. Во-первых, многие из них строго не следуют за определенной методологией, они скорее выбирают некоторые из ее основных принципов и комбинируют их в «новый» подход. Во-вторых, есть много случаев, когда исследователи смешивают различные стратегии в единственный подход, и поэтому невозможно выработать единую классификацию.

Принимая во внимание вышеупомянутое, для классификации отдельных работ было создано четыре основные категории. К ним относятся: (I) подходы, основанные на теории обработки для разработки аналитических моделей и/или компьютерных алгоритмов представления обрабатываемой

поверхности; (II) подходы, изучения влияния различных факторов, через проведения экспериментов и анализ полученных результатов; (III) подходы, которые используют метод планирования экспериментов, и (IV) подходы искусственного интеллекта (ИИ).

2. Подход, основанный на теории обработки

Эта категория включает подходы, которые делают акцент на определенных аспектах из теории обработки, таких как кинематика процесса, свойства режущего инструмента, механизм стружкообразования и т.д. Методы и инструменты системы автоматизированного проектирования (CAD) используются для достижения цели построения модели, которая будет в состоянии моделировать образование профиля обработанной поверхности, таким образом, визуализируя поверхностную топографию и оценивая шероховатость поверхности.

Вообще, геометрическое моделирование формирует базис подхода через строгие математические уравнения. Эту модель затем осуществляет компьютерный алгоритм, необходимый для управления сложными вычислениями. Кроме того, есть некоторые теоретические модели, которые связывают шероховатость поверхности с параметрами резания, такими как скорость подачи [3]. Такие модели на сегодняшний день являются не точными, их усовершенствованием, с введением дополнительных параметров, в настоящее время занимаются многие исследователи.

В любом случае эксперименты проводятся с целью сравнения теоретического результата с фактическим. Необходимо отметить, что явления, ведущие к образованию поверхностной шероховатости, имеют очень сложную природу взаимодействия, поэтому комплексное решение этого вопроса ещё не найдено.

Теоретические основания, использованные для научно-исследовательских работ в этой категории, являются необходимым условием для тех, кто занимается исследованием механообработки.

2.1. Исследования теории механообработки

В 1996 г. Grzesik [4] использовал минимальную недеформированную толщину стружки для определения величины шероховатости при токарной обработке. Для математического моделирования трибологических эффектов в области контакта стружки и режущего инструмента были использованы молекулярно-механическая теория трения (теория Крагельского) и теория пластичности (Hencky-Пыушин). Подход был основан на предположении, что разница между теоретической и фактической величиной шероховатости поверхности связана с адгезией в области контакта стружки и режущего инструмента и что минимальная недеформированная толщина стружки зависит от перехода от грубого процесса резания к микрорезанию. Таким образом, была усовершенствована существующая на тот момент модель прогнозирования шероховатости поверхности и значительно снижена разница между теоретическими и фактическими результатами.

В работе [5] была создана поверхностная имитационная модель топографии для моделирования профиля поверхности образованного после токарной обработки с известными вибрационными характеристиками. Модель объединила воздействие геометрии инструмента, параметры процесса резания и влияние относительного движения между режущим инструментом и заготовкой на качество обработанной поверхности, которое анализировалось в трёх направлениях: радиальном, тангенциальном и осевом. Соотношение частоты колебаний, которое было определено как отношение вибрационных колебаний к частоте вращения шпинделя, дало возможность определить периодичку поверхностной волнистости вдоль осевого направления. Было также определено, что радиально направленные вибрации влияют на величину шероховатости поверхности гораздо больше, чем тангенциально направленные или осевые вибрации, чего и следовало ожидать.

В исследовании Ваек и др. [6] представлена модель поверхностной шероховатости для торцевого фрезерования, учитывающая габариты и ошибку биения каждой вставки в корпусе режущего инструмента. Было установлено, что из-за производственных погрешностей при создании режущего инструмента имеют место погрешности биения как осевые (воздействующие на глубину резания) так и радиальные (воздействующие на шероховатость поверхности). Для формирования геометрической модели во внимание была принята и скорость подачи. После обоснования правильности модели с экспериментальными данными процесса резания норма удельного съема материала была максимизирована через оптимизацию скорости подачи с шероховатостью поверхности, посредством алгоритма оптимизации деления пополам.

Методика компьютерного моделирования, разработанная в работе [7], представила спектр компонентов поверхностной топографии, классифицируя по форме, волнистости и шероховатости, в зависимости от способа подходящего для генерации макро- и микро-уровня команд конечного положения. Для осуществления такого подхода трёхмерный (3D) фильтр разрабатывался в четыре этапа. Во-первых, было использовано фильтрование профиля поверхности для удаления поверхностного профиля из контролируемых данных, которые могут привести к естественной форме поверхности. На следующем этапе, для определения шероховатости и волнистости, использовался анализ внешней топографии методом 3D лейтмотивного фильтра, что дало возможность рассчитать погрешность внешнего профиля как среднее отклонение теоретического и фактического профиля поверхности в пределах каждого элемента поверхностной волнистости. Затем для формирования шероховатости, волнистости и погрешности профиля поверхности, ранее удаленные профиль поверхности был снова добавлен. Наконец, модель шероховатости поверхности была получена с помощью B-spline кривой, подходящей для регенерирования значений шероховатости в пределах каждого её элемента. Аналогичным

образом и модели волнистости поверхности и модели погрешности формы поверхности могут быть получены регенерированием данных посредством B-spline кривой. Вся модель основана на созданных трехмерных элементах и необходимых правилах их комбинации.

Ehmann и Hong [8] ввели новый метод представления процесса формирования поверхности, который имеет название «система формирования поверхности». Эта система состояла из двух частей: первая моделировала кинематику металлообрабатывающего оборудования, вторая – геометрию режущего инструмента. Для инструмента определённый интерес заключался в области режущей кромки, описанной как пересечение грани инструмента и боковой поверхности с учётом соответствующих углов. В целом «система формирования поверхности» смогла выдать отчёт о биении шпинделя и вибрациях станка, в то время как дополнительное исследование для оценки сил резания было все еще в процессе разработки. В работе система была применена для моделирования 3D топографии отдельно фрезерованной поверхности.

Kim и Chu [9] заявили, что шероховатость поверхности может быть определена максимальной высотой гребешка. Благодаря процедуре наложения структур была сформирована трехмерная структура поверхности в соответствии с заданными условиями резания и типом режущего инструмента. Эффект биения (классифицированный как геометрическое биение, вызванное эксцентриситетом оси и неровностями режущей кромки и как динамическое биение вызванное вибрацией и отклонением инструмента) был включен, чтобы теоретическую поверхность максимально можно было приблизить к фактической. Обобщенное описание режущего инструмента было создано путём введения представления радиуса переходной кривой как переменной, что обеспечило описание концевых сферических фрез, закруглённых концевых фрез и торцевых концевых фрез. Данный метод помимо обеспечения текстуры механообработанной поверхности может использоваться для определения оптимальной траектории движения режущего инструмента.

В работе Lee и др. [10] рассматривается формирование шероховатости поверхности и профиля в процессе высокоскоростного концевой фрезерования. Представлен метод имитации обработанной поверхности, в котором вместо сил резания использован сигнал ускорения. Было установлено, что вибрация вызванная высокой скоростью шпинделя ухудшает геометрическую точность обработанной поверхности. Для моделирования смещения концевой фрезы и угла наклона была использована геометрическая модель концевой фрезерования. Был разработан компьютерный алгоритм согласно условиям параметров биения, геометрии режущего инструмента и заготовки, и параметров биения для определения углового положения фрезы. Координаты позиций концов желобков были получены с использованием геометрического моделирования процесса концевой фрезерования и пиковым частотным компонентам сигнала

ускорения. Таким образом, из полученных данных может и быть посчитана шероховатость поверхности, и интегрирован профиль.

2.2 Вывод

Делая вывод, отметим, что эти теоретические исследования по большей мере моделируют процесс резания с точки зрения кинематики и свойств режущего инструмента. Более точные модели и впечатляющие результаты получились при попытке включения в математические модели дополнительных параметров, таких как вибрации. Недостатком такого подхода является то, что многие другие факторы (износ и отклонение режущего инструмента, тепловые явления), влияющие на механизм формирования шероховатости не рассматриваются. Интеграция этих факторов к уже существующим моделям необходима для того чтобы увеличить их точность, что особенно актуально при использовании усовершенствованных моделей в случаях конечных операций.

3. Подход, основанный на экспериментальных исследованиях

Экспериментальный подход может считаться самым «тривиальным» методом, т. к. заключается в экспериментах, результаты которых используются для исследования влияния каждого фактора на наблюдаемые качественные характеристики. Для построения моделей, основанных на экспериментальных данных, часто используется регрессионный анализ. Интуиция исследователя и проницательность играют значительную роль в этот подходе, но для получение желаемого результата необходимо и глубокое понимание исследуемого явления. Экспериментальный подход в основном принят в тех случаях, когда невозможно аналитическим путём разработать причинно-следственные связи между различными факторами.

3.1. Экспериментальные исследования

Отношения между износостойкостью инструмента, шероховатостью поверхности и вибрациями рассматривалось в работе [11]. Были учтены следующие переменные: скорость резания, скорость подачи, глубина резания, радиус передней части инструмента, вылет инструмента, угол врезания, длина и диаметр заготовки, и ускорение в радиальном направлении и направлении подачи. Сигналы ускорения подавались на анализатор (FFT), который выработывал ASCII файлы. Для создания модели регрессионного анализа были проанализированы экспериментальные данные.

Для контроля износа инструмента и корреляции между прогрессией износа инструмента и шероховатостью поверхности при тчении Ghani и Choudhury [12] разработали подобный подход, в котором в основу положили сигнал вибрации. Эксперименты проводились на закалённом чугуне инструментом с керамическим покрытием, нечто приводило к очень короткому периоду стойкости инструмента (около 1,5 мин.).

Jang и др. [13] сосредоточились на развитии онлайн метода измерения шероховатости, изучая влияние вибрации механообработки во время токарной обработки деталей высокой твердости. Было предположено, что средняя шероховатость поверхности – результат наложения теоретического

профиля (кинематика процесса) и колебательного профиля (динамика процесса). Для измерения относительного перемещения между режущим инструментом и заготовкой использовался индуктивный датчик перемещения. Результаты показали, что у шероховатости поверхности вдоль обрабатываемой детали имелись определенные частотные компоненты, которые были определены подачей в низком частотном диапазоне, и которые были тесно связаны с собственными частотами системы шпиндель-заготовка в высокочастотном диапазоне.

Для прогнозирования качества поверхности в работе [14] был использован акустический анализ излучения. Акустическая эмиссия (АЭ) определяется как класс явлений, посредством которых переходные эластичные волны производят быстрое освобождение энергии от локализованных источников в пределах материала. В случае точения, такие источники могут иметь место в первичных (за счет образования стружки), вторичных (из-за трения между режущим инструментом и стружкой) и третичных (из-за трения между режущим кромкой инструмента и заготовкой) зонах резания. Вместо того, чтобы использовать среднее квадратичное значение измеряемых сигналов АЭ в работе была введена новая величина $A E_{RMS20}$ и установлено соотношение с шероховатостью поверхности.

Потенциал для использования криогенного охлаждения в процессе резания и особенно его результатах на износ инструмента, размерную точность и качество поверхности был исследован в работе [15]. С этой целью было выполнено сравнение между влиянием струи жидкого азота на режущий инструмент и сухой обработкой. Результаты показали, что криогенное охлаждение улучшило качество поверхности, уменьшая износ вспомогательной режущей кромки (вызванного трением), процесс стружкообразования и появления зазубрин.

В работе [16] была проведена серия экспериментов, направленных на определение скорости резания для составной режущей кромки образованной в процессе точения. Основываясь на экспериментальные данные, было создано две математические модели, которые коррелируют шероховатость поверхности с параметрами резания. Одна из которых включает влияние радиуса закругления режущего инструмента, подачи, скорости резания и глубины резания, а во второй модели в добавок рассматривается твердость обработанной поверхности.

Подробное исследование о влиянии геометрии режущей кромки и твердости обработанной заготовки на качество поверхности и силы резания при чистой токарной обработке деталей высокой твердости приведено в работе [17]. Экспериментальное изучение включало:

- точную характеристику геометрии режущей кромки, для измерения особенностей режущей кромки;
- эксперименты на жестком оборудовании с хорошей шпиндельной точностью, для минимизации вибраций;

- дисперсионный анализ, для установления статистического значения параметров.

Результаты показали значительное влияние деформированного радиуса режущей кромки и твердости заготовки на шероховатость поверхности и силы резания.

В работе [18] авторы сосредоточились на анализе качества сложной поверхности после 3- и 5-осевого фрезерования, основываясь на таких параметрах, как величина перебега «stepover» и направление подачи. При сравнении результатов 5-осевого фрезерования концевой сферической фрезой и торцевой фрезой определили, что малое значение шероховатости может быть получено в процессе фрезерования торцевой фрезой наклоненной в направлении подачи.

В работе [19] использован другой подход, в пределах которого в процессе мониторинга и контроля шероховатости поверхности была разработана ультразвуковая система. Сверхзвуковой чувствительный элемент, подсоединенный к ПК, воспроизводит импульс, а затем измерял амплитуду возвращенного сигнала, который отражался поверхностью заготовки. Система, посредством данных полученных с иглы профилометра, способна была воспроизвести фактические значения шероховатости. Главное преимущество состояло в том, что в сравнении с другими недоработанными схемами процесса на результат не влияла смазочно-охлаждающие жидкости и стружкообразование. Кроме того была продемонстрирована схема управления, которая направлена на поддержание постоянной шероховатости поверхности в процессе износа инструмента.

В работе [20] представлен аргумент утверждающий, что длина сечения, число зубьев, силы резания и зацепление зуба режущего инструмента с заготовкой воздействуют на относительную позицию режущего инструмента и заготовки, а, следовательно, на срок службы инструмента, износ инструмента и шероховатость поверхности воздействуют те же факторы.

В работе [21] исследовалось отношение между колебаниями и формированием поверхности при плоском фрезеровании. Поскольку периодическая структура микроуглублений, полученная последовательным зацеплением зуба, является основным параметром шероховатости поверхности, было высказано предположение, что в динамическом процессе, различные профили поверхности будут зависеть от амплитуды, частоты и фазы относительного движения между заготовкой и режущим инструментом. Был проведен анализ влияния каждого из зубов режущего инструмента на конечный профиль поверхности посредством экспериментов с известными вибрационными характеристиками.

3.2 Выводы

Подход, основанный на экспериментальных исследованиях – самый обычный подход. Стратегия эксперимент-наблюдения-вывод – краеугольный камень каждой научно-исследовательской деятельности. Преимущество такого подхода заключается в том, что его не трудно реализовать, и что, в

зависимости от уровня понимания явлений и процессов, он может выдать очень хорошие результаты. С другой стороны, полученные выводы имеют малое либо вообще не имеют применения. Необходимо подчеркнуть, что эксперименты могут и не выдать ожидаемые результаты, т. к. существует большое количество факторов, требующих рассмотрения – не только относящиеся к исследуемым явлениям, но и к применяемому оборудованию.

4. Подход метода планирования экспериментов

Причиной классификации экспериментов в другую категорию послужило то, что они представляют собой систематический метод, касающийся планирования экспериментов, сбор и анализ данных с почти оптимальным использованием имеющихся ресурсов.

Методология поверхностной чувствительности и метод планирования эксперимента Taguchi являются наиболее распространенными методологиями для решения проблемы прогнозирования шероховатости, именно поэтому мы описали их ниже.

4.1 Методология поверхностной чувствительности

В методологии поверхностной чувствительности (МПЧ) факторы, которые рассматривают как самые важные, используются для построения полиномиальной модели, в которой независимая переменная - результат эксперимента. Для определения глобального минимума чувствительности планируются и проводятся эксперименты, которые уменьшают чувствительность поверхности. Градиент чувствительности поверхности использован с алгоритмом сверхбыстрого перемещения, как указано в работе [22].

4.1.1 Этап 1

- Выбор факторов, которые необходимо исследовать.
- Проектирование и управление двухуровневым экспериментом в локализованной области реакции поверхности.
- Вычисление расчётных данных результатов и, следовательно, вычисление коэффициентов линейной модели:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n . \quad (1)$$

- Выбор эталонного показателя, который будет использован в качестве ориентира при планировании получения необходимого результата в кратчайшие сроки.
- Выбор ряда экспериментальных условий и управление испытаниями, для определения увеличения реакции. Если реакция перестала увеличиваться – необходимо генерировать новый подход.
- Если необходим новый подход – необходимо повторное моделирование и управление двухуровневым экспериментом. Все шаги повторяются до тех пор, пока не будет получен существенно улучшенный результат.

4.1.2 Этап 2

- Проектирование и управление трёхуровневым экспериментом, если путь «наименьшего сопротивления» в результате не дает существенного усовершенствования.

- Вычисление коэффициентов модели:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + \dots + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_{n-1,n} X_{n-1} X_n. \quad (2)$$

- Использование данной модели позволяет определить характер стационарных точек чувствительной поверхности. Только в стационарных точках градиент равен нулю.

Последовательность характера рассмотренной методологии в процессе исследования позволяет узнать больше о процессе или исследуемой системе. В результате применения этой методологии исследователь гарантировано научится:

- определять необходимое количество репликации;
- определять расположение оптимальной области;
- определять, какой тип аппроксимирующей функции требуется;
- сделать правильный выбор экспериментальных проектов;
- определять требуется ли преобразование чувствительности или любой из переменных процесса.

4.2 Метод планирования эксперимента Taguchi

Метод планирования эксперимента Taguchi основан на ряде шагов, которые нацелены на улучшение понимания результата или рабочих характеристик процесса [24].

Фаза планирования:

1. Постановка проблемы.
2. Постановка цели эксперимента.
3. Выбор качественных характеристик и систем измерения.
4. Выбор факторов, которые могут влиять на качественные характеристики.
5. Выбор уровней факторов.
6. Выбор соответствующих матриц Taguchi или ортогональных массивов.
7. Выбор взаимодействий, которые могут влиять на качественные характеристики.
8. Представление факторов в ортогональные массивы и поиск взаимодействий.

Фаза выполнения:

9. Проведение предварительного эксперимента посредством ортогонального массива.

Аналитическая фаза:

10. Анализ экспериментальных результатов, например с использованием дисперсионного анализа.
11. Проведение подтверждающего эксперимента.

Существует три типа ортогональных массивов (ОМ): двухуровневое распределение показателей, трёхуровневое и смешанное. Выбор соответствующего ОМ основан на следующих критериях: количество показателей и интерактивность пользы, количество уровней качественных показателей, желаемое экспериментальное решение или ограниченная стоимость. Первые два определяют наименьшие ОМ, которые возможно использовать, а третий дает возможность проводить больше экспериментов с более высоким разрешением.

Для распределения критериев в столбцы ОМ необходимо учитывать математические свойства приведенные работе [24].

4.3 Исследования спланированных экспериментов

Целью Davim [25] было установление корреляции между скоростью резания, подачей, глубиной резания и шероховатостью поверхности при токарной обработке. Для этого был смоделирован и осуществлён план экспериментов, основанный на методе Taguchi. Результаты показали, что скорость резания имела огромное влияние, меньшее влияние имела подача. Достигнутая погрешность оказалась гораздо меньшей, чем у геометрико-теоретической модели.

В работе [26] была предпринята попытка прогнозирования шероховатости поверхности при точении высокопрочной стали с помощью МПЧ. В соответствии с разработанной моделью результат не очень хороший: влияние подачи на шероховатость поверхности гораздо больше, чем влияние скорости резания.

Feng и Wang [27] для построения математической модели чистового точения ввели шесть параметров: твердость заготовки, подачу, вершину инструмента, глубину резания, скорость вращения шпинделя и время обработки. Проверив гипотезу была установлена адекватность модели. Подача и время обработки были определены как наиболее важные факторы.

Методология поверхностной чувствительности была использована в работе [28] для оценки влияния прошлых технологических процессов на шероховатость обработанных поверхностей. Результаты показали, какие параметры механообработки должны использоваться для различных комбинаций режущий инструмент–материал заготовки для достижения требуемой шероховатости поверхности. Позже теми же учёными в работе [29] было проведено исследование влияния свойств обрабатываемого материала, параметров резания и TiN покрытия на шероховатость поверхности полученной в процессе сухого точения с применением метода Taguchi.

Глубокое исследование влияния колебаний режущего инструмента на образование шероховатость поверхности в процессе сухого точения приведено в работе [30]. Во внимание было принято шесть параметров, в том числе заготовка и длина режущего инструмента. Дисперсионный анализ и анализ взаимодействия экспериментальных данных показал, что подача и радиус закругления режущего инструмента – самые влиятельные параметры

и, что лучшая шероховатость была получена при высокоскоростной обработке с малыми подачами и большим радиусом закругления режущего инструмента. Кроме того, была измерена амплитуда естественной частоты вибраций инструмента, в результате было определено, что изменение стружки ведет себя как динамическая сила, возбуждающая вибрации инструмента.

Ещё реализация методологии поверхностной чувствительности встречается в работах [31, 32]. В этих работах были сформированы модели шероховатости поверхности для концевоего фрезерования стали 190 ВНН и Inconel 718. Наряду с диаграммами профиля были построены модели первого и второго порядка, позволяющие быстрее выбирать необходимые комбинации скорости резания и подачи, что дало возможность увеличить скорость удаления металла с рабочей зоны без ущерба качества поверхности.

Целью работы [33] было изучение влияния режимов резания и геометрии режущего инструмента на качество обрабатываемой поверхности и построение математической модели предсказания остаточной шероховатости. Так же проводилось исследование влияния вышеперечисленных факторов на остаточные напряжения. Инновация работы заключается в том, что для разработки модели был использован симбиоз методов МПЧ и Taguchi.

Методология поверхностной чувствительности нашла своё успешное применение в моделировании шероховатости поверхности труднообрабатываемых материалов, таких как EN 32 (упрочненная углеродистая корпусная сталь) [34]. Построенные модели акцентировались на скорости резания, подаче и осевой глубине резания в условиях сухой механообработки. Модель первого порядка объединяла диапазон скоростей 30-35 м/мин, а модель второго порядка – 24-38 м/мин.

4.4 Выводы

Общей целью исследованных методов является организация экспериментальной процедуры и необходимой обработки данных, однако, пути достижения этой цели у каждого из них свои. МПЧ – процедура разработки модели, направленная на исследование влияния факторов на результат эксперимента и ведёт к формированию полиномиальных моделей первого и второго порядка, которые включают рассматриваемые параметры и их статические значения. Эти модели используются для создания профильных диаграмм, которые имеют большую практическую ценность, чем используемые полиномиальные функции. С другой стороны метод Taguchi – процедура разложения-скрининга для определения значения каждого фактора, т. е. этот метод определяет наиболее важные параметры и значения, которые выдают необходимый результат, без разработки какого-либо рода модели. Тем не менее, следует отметить, что из-за их всеобщности и сильного статистического фона, определенные задания этих методологий могут быть выделены и применены к широкому спектру технических задач, где необходимо сузить размер области поиска.

5. Подход основан на применении искусственного интеллекта

Искусственный интеллект в инженерных задачах осуществляется посредством разработки моделей искусственных нейронных сетей (ИНС), генетических алгоритмов (ГА), нечётких логических схем и экспертных систем. Применение ИНС и ГА дают возможность быстро и качественно обрабатывать информацию и принимать решения, именно поэтому применение этих систем при решении задачи прогнозирования шероховатости поверхности сегодня вызывают широкий интерес.

5.1 Обзор искусственных нейронных сетей

ИНС – система обработки информации, которая проявляет функции биоаналога. По существу, это математическая модель, которая имитирует человеческое мышление и нейробиологию, и основана на следующих предположениях [35]:

- Обработка информации осуществляется рядом простых элементов называемых нейронами.
- Сигналы между нейронами передаются через соединительные связи.
- Каждая соединительная связь имеет взаимодействующее влияние, которое умножает передаваемый сигнал.
- Каждый нейрон использует активацию функции входящего сигнала для определения его выходного значения (рис. 2).

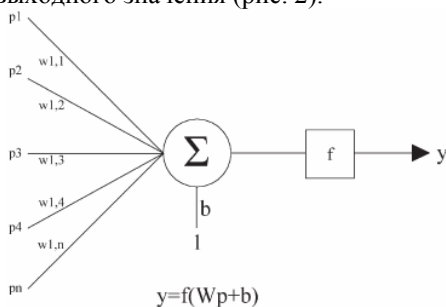


Рис. 2 – Нейронная модель

ИНС в основном используются для распознавания образов, распознавания и классификации связей, условной оптимизации и моделирования систем с приложениями, начиная от простой обработки сигналов до медицинской диагностики.

Существует две основные характеристики ИНС:

1. Распознавание архитектуры сети, которая определяет тип задач, которые могут быть решены.
2. Метод определения влияния соединений, либо с использованием учебного алгоритма (контролируемое обучение), либо выведением классификаций (неконтролируемое обучение).

Наиболее распространенные типы ИНС, использованные в проанализированной литературе – прогнозирование с управлением ИНС связанной с некоторой вариацией алгоритма обратной связи.

Типичная архитектура таких ИНС представлена на рис. 3. Нейроны расположены слоями: входной слой, скрытый слой и выходной слой (слева направо). Входной слой используется для представления данных в ИНС, а выходной – для получения реакции ИНС.

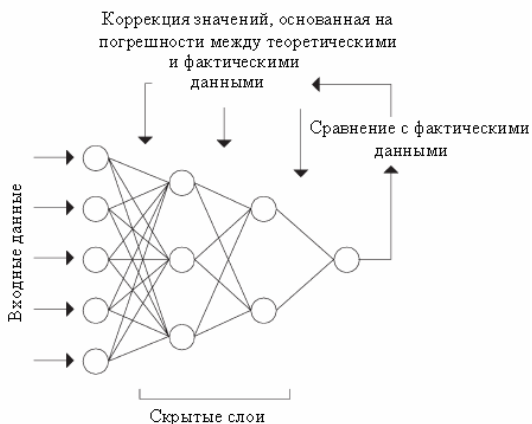


Рис. 3 – Структура искусственной нейронной сети

5.2 Обзор нечётких нейронных систем

Нечёткая логика основана на концепции нечётких множеств, которые не имеют четко определённые границы и могут содержать элементы с частичной степенью членства (между 0 и 1). Более строгое определение гласит, что нечётким множеством M от X является функция из множества X в единичном интервале, т. е. $m: X \rightarrow [0,1]$. Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности (Membership Function).

Для нечетких множеств, как и для обычных, определены основные логические операции. Самыми основными, необходимыми для расчетов, являются пересечение и объединение.

Нечеткая переменная описывается набором (N, X, A) , где N – это название переменной, X – универсальное множество (область рассуждений), A – нечеткое множество на X .

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода является база правил, содержащая нечеткие высказывания в форме "Если-то" и функции принадлежности для соответствующих лингвистических термов.

Результатом нечеткого вывода является четкое значение переменной y^* на основе заданных четких значений x_k , $k=1..n$.

Нечеткие нейронные сети (fuzzy-neural networks) осуществляют выводы на основе аппарата нечеткой логики, однако параметры функций принадлежности настраиваются с использованием алгоритмов обучения НС. Поэтому для подбора параметров таких сетей применим метод обратного распространения ошибки, изначально предложенный для обучения многослойного персептрона. Для этого модуль нечеткого управления представляется в форме многослойной сети. Наибольшее распространение в настоящее время получили архитектуры нечеткой НС вида ANFIS и TSK. Доказано, что такие сети являются универсальными аппроксиматорами. Быстрые алгоритмы обучения и интерпретируемость накопленных знаний – эти факторы сделали сегодня нечеткие нейронные сети одним из самых перспективных и эффективных инструментов мягких вычислений.

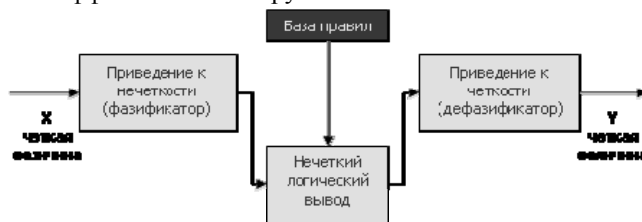


Рис. 4 – Система нечеткого логического вывода.

Глубокое описание нечетных нейронных сетей приведено в работах [36, 37, 38].

5.3 Обзор генетических алгоритмов

Генетические Алгоритмы - адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации, основанные на дарвиновской теории эволюции. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов.

ГА состоит из следующих компонент:

- *Хромосома*. Решение рассматриваемой проблемы. Состоит из генов.
- *Начальная популяция* хромосом.
- *Набор операторов* для генерации новых решений из предыдущей популяции.
- *Целевая функция* для оценки приспособленности (fitness) решений.

Стандартные операторы для всех типов генетических алгоритмов это: селекция, скрещивание и мутация.

ГА является достаточно мощным средством и может с успехом применяться для широкого класса прикладных задач, включая те, которые трудно, а иногда и вовсе невозможно, решить другими методами. Однако, ГА, как и другие методы эволюционных вычислений, не гарантирует

обнаружения глобального решения за полиномиальное время. ГА-мы не гарантируют и того, что глобальное решение будет найдено, но они хороши для поиска "достаточно хорошего" решения задачи "достаточно быстро". Там, где задача может быть решена специальными методами, почти всегда такие методы будут эффективнее ГА и в быстродействии и в точность найденных решений. Главным же преимуществом ГА-мов является то, что они могут применяться даже на сложных задачах, там, где не существует никаких специальных методов. Даже там, где хорошо работают существующие методики, можно достигнуть улучшения сочетанием их с ГА. Принципы работы ГА описаны в работе [39].

6.4 Исследование искусственного интеллекта

Для оценки шероховатости поверхности и отклонения номинального размера во время токарной операции в работе [40] использован метод сенсорного слияния. Систематический метод выбора типа датчиков в среде системы измерения определялся средним влиянием каждого. Датчики, с наилучшими рабочими характеристиками объединялись с использованием ИНС моделирования. Результаты показали, что модели, созданные данным методом точнее, чем разработанные для сравнения модели регрессионного анализа.

Датчик слияния, включающий ИНС, также описывается в работе [41]. Емкостные, индуктивные и волоконно-оптические датчики были использованы так, чтобы охватить как можно более широкий диапазон применения определенных особенностей, которые не могут быть обнаружены одним типом датчика. Значение МПЧ из трех датчиков вместе с типом производственного процесса (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка и шлифование), все из которых были закодированы в двоичном формате, были использованы для обучения $17 \times 20 \times 15$ ИНС, а полученные результаты можно охарактеризовать как достаточно хорошие.

Работы Chien и Chou [42] можно разделить на две части. Первая часть посвящена построению трех интеллектуальных моделей с использованием многослойных функционально связанных сетей: 1 – для шероховатости поверхности; 2 – для сил резания; 3 – для срока службы инструмента. Вторая часть сосредоточена на поиске оптимальных режимов резания путем объединения шероховатости поверхности и сети срока службы инструмента с генетическим алгоритмом. Таким образом, были получены режимы резания, которые максимизируют скорость удаления металла из зоны резания с учетом ограничений шероховатости поверхности и срока службы режущего инструмента.

Suresh и др. [43] также приняли двухступенчатый подход к оптимизации шероховатости поверхности. Во-первых, экспериментальные результаты были использованы для создания двух математических моделей шероховатости поверхности по методу регрессии соответственно МПЧ. Во-вторых, в качестве целевой функции была взята математическая модель

второго порядка, оптимизированная посредством ГА для определения условия обработки поверхности с предопределённым качеством.

В работе [44] рассматривались полиномиальные сети для построения соотношений между параметрами процесса резания (скоростью резания, подачей, глубиной резания) и производительностью резания (сроком службы инструмента, шероховатостью поверхности и силы резания). При сравнении полиномиальных сетей и сетей прямого распространения было определено, что первые имеют высшую точность прогнозирования и меньше внутренних связей. Кроме того, лучшая сетевая структура была определена с помощью алгоритма синтеза полиномиальных сетей (ASPN). Принцип критерия ASPN – выбор сети требуемой точности, но минимальной сложности.

Li и др. [45] разработали гибридные модели обработки, которые объединяют аналитические модели и нейронные сетевые модели для прогнозирования всех характеристик процесса обработки. Аналитический компонент, основанный на интеллектуальной теории обработки, предложенный Oxley [46] служил предиктором силы резания, температуры в зоне резания и геометрии стружки. Он также служил в качестве модели нейронной сети предварительной обработки, для предсказания износа инструмента, шероховатости поверхности и скола стружки, т. е. тех параметров, которые не могли быть полностью рассмотрены аналитическим образом.

Другой подход, использовавший критерий определения архитектуры сети можно найти в работе [47], цель которой заключалась в разработке модели прогнозирования, предшествующей осуществлению самого процесса обработки, для установления определенных режимов резания (скорости резания, подачи и глубины резания) для получения желаемого значения шероховатости поверхности и значения силы резания. Кроме того, используя полученную силу резания, можно рассчитать мощность резания и оптимальную скорость удаления металла. Абдуктивные сети, которые были созданы с использованием критерия ожидаемой погрешности (PSE) являются более точными, чем соответствующие модели регрессионного анализа.

В работе [48] был представлен подход, осуществляющий оценку влияния характеристик станка на процессы резания с использованием адаптивного прогнозирования. Сети для прогнозирования шероховатости поверхности имели в качестве входа скорость резания, взаимосвязь режущего инструмента и заготовки, неоднородность стружки, структуру сборной режущей кромки (которая оценивается по средней температуре режущей кромки), ширину износа и теоретическую шероховатости с учетом износа инструмента.

ИНС моделирование, с использованием спланированных экспериментов, было применено Benardos и Vosniakos [49] для процесса плоского фрезерования. Была создана конечная модель пересчета скорости подачи на зуб, глубины резания, зацепления режущего инструмента, использования смазочно-охлаждающей жидкости и компонентов сил резания

в направлении подачи. Результаты этого исследования показали, что ИНС могут быть чрезвычайно точными, даже если они используются для решения сложных задач, таких как обработка алюминиевых сплавов. Кроме того, использование разработанных экспериментов дало в результате систематический скрининг ИНС топологий с целью оптимизации окончательной используемой топологии.

В исследовании Tsai и др. [50] в процессе обработки был применён акселерометр в качестве датчика. После сбора данных вибраций системы станок-заготовка в процессе концевого фрезерования на вертикальном обрабатывающем центре, ИНС прямого распространения прошел обучение и испытания не только для достижения цели распознавания шероховатости поверхности в процессе, но и для увеличения скорости обработки и улучшения качества продукции. Кроме того, была разработана статистическая модель многократной регрессии и сравнена с предложенной моделью ИНС. Входными параметрами являлись скорость вращения шпинделя, скорость подачи, глубина резания и средняя вибрация за один оборот. В результате определили, что модели ИНС показали себя лучше во всех ситуациях.

В работе [51] представлен новый подход измерения поверхностной шероховатости посредством системы внешнего распознавания, использовавшей нечеткие нейросети и датчики тестирования системы. Подготовка процедуры состояла из пяти этапов:

1. Разделение входного пространства в нечетких областях;
2. Генерирование нечетких правил из данных пар через эксперименты;
3. Аннулирование противоречивых правил;
4. Развитие базы комбинированных нечетких правил;
5. Определение отображения система, основанного на базе нечетких правил.

Затем были определены нечёткие правила и функции принадлежности, которые были скорректированы в соответствии с требованиями контрольных параметров фрезерной системы. Изначально метод предназначался для одного типа материала и режущего инструмента, но позже он был расширен исследователями Chen и Savage [52], посредством добавления нового набора параметров (в том числе диаметра инструмента и характеристик обрабатываемого материала).

В работе [53] для прогнозирования шероховатости поверхности при токарной обработке была использована адаптивная нечёткая нейросистема и компьютерный анализ. Система компьютерного анализа, охватывая цифровую камеру (присоединённую к ПК) и соответствующие источники света, обеспечила внешние изображения, которые анализировались для вычисления средней арифметической величины серых уровней. Результаты вычислений и параметры резания (в общей сложности 4 входа) были использованы для получения адаптивной нечёткой нейросистемы (ANFIS) и определения значений шероховатости.

5.5 Выводы

Несмотря на то, что эти методики были разработаны несколько десятилетий назад, последние достижения в этой области (например, учебные алгоритмы ИНС) и быстрый рост доступных вычислительных способностей возобновили интерес исследователей. Очевидно, что подходы, описанные в данном разделе могут произвести очень хорошие результаты и одновременно дать возможность оперативного мониторинга и / или управления процессом.

Главное преимущество ИНС в сравнении с классическим программированием – возможность управления шумовыми или некомплексными данными, при этом нет необходимости явно формулировать проблему, алгоритм решения или писать код; процесс сбора информации, распределяется по нейронам, работающим параллельно, поэтому в результате увеличивается вычислительная мощность, в отличие от последовательной работы современных компьютеров. Наиболее очевидным недостатком ИНС является то, что нет никакой гарантии их производительности в результате применения.

У ГА существует два основных преимущества: простота эксплуатации и эффективное решение проблемы многокритериальной оптимизации. С момента появления готового к применению ГА отпала необходимость писать код для выбранного приложения с нуля. Единственным условием является кодирование данных для формирования хромосом и разработки соответствующей функции соответствия. Основным недостаток ГА – привязанность к вычислительной способности, на платформе типичного ПК результат может быть получен через несколько дней с момента запуска.

6. Выводы и обсуждения

В текущей работе представлен обзор различных подходов, используемых зарубежными исследователями для прогнозирования шероховатости поверхности. Замечания, касающиеся каждого подхода, отмечены в соответствующих разделах. Как видно из рассмотренных работ, в последние годы наблюдалась повышенная научно-исследовательская активность в этой области; представлены хорошие результаты, но учитывая стремительный переход на повышенные скорости обработки, моделей, рассматривающих многоосевую высокоскоростную механообработку, в большом объеме найти не удалось. Необходимо отметить, что на сегодняшний день в рамках одной модели прогнозирования шероховатости невозможно описать последовательные стадии механообработки. Формирующаяся тенденция призывает к построению большего количества автоматизированных систем для он-лайн мониторинга, измерения и контроля, главным образом за счет автоматизации самих процессов. Все представленные методики могут обладать преимуществами и недостатками в сравнении друг с другом, но, учитывая эту тенденцию, наиболее перспективными считаются теоретические подходы и подходы ИИ.

Сравнение этих двух подходов показывает, что ИИ модели учитывают особенности используемого оборудования и реальных явлений механической

обработки. С другой стороны, теоретический подход основан на допущениях и идеализации, которые ответственны за ошибки и ограничения. Удивительно, что комбинированные усилия, которые включали бы как ИИ, так и аналитическое моделирование, для проверки уточнения или корректировки теоретических моделей в литературе не были найдены.

Оптимизация режимов резания для определения шероховатости поверхности является той областью, которая не получила достаточно большого внимания. ГА и другие алгоритмы оптимизации можно с высокой эффективностью использовать для прогнозирования шероховатости поверхности в сочетании с развитыми моделями, но как видно из выше написанного, на сегодняшний день очень мало подобных подходов было найдено.

Следует отметить, что, несмотря на разработанные точные модели, есть еще вопросы, которые требуют глубокого изучения. Задачи точности обработки, где шероховатость поверхности имеет большое значение, по-прежнему исследуются. Для описания фактической шероховатости поверхности в разрабатываемые модели необходимо ввести такие факторы, как отклонение режущего инструмента и тепловые условия. Интеграция существующих моделей в более общую консультативную систему, которая может быть использована, например оператором станка, может принести большую практическую пользу.

На рис. 5 схематически отображены широко исследуемые параметры, влияющие на шероховатость поверхности.



Рис. 5 – Параметры, влияющие на шероховатость поверхности

Из обзора работ зарубежных авторов следует, что описанию шероховатости материалов уделяется огромное внимание. Однако работы по описанию шероховатости сложных поверхностей при современных условиях высокоскоростной многокоординатной обработки носят эпизодический или рекламный характер. Это можно, с одной стороны, объяснить сложностью в математическом описании процесса и вычислительными трудностями, а с другой стороны, большим коммерческим интересом производителей современного многокоординатного оборудования и разработчиков программного обеспечения к проводимым научным исследованиям, и как следствие, конфиденциальности полученной информации.

Становится очевидным, что конечное качество поверхности изделий, требования к которому непрерывно растут, требует прогнозирования качества поверхности не только на этапе финишной операции, но и на предварительных этапах обработки, что невозможно выполнить в рамках одной модели или математического описания.

Например, известно, что высокоскоростное фрезерование позволяет производить механическую обработку сталей, как в исходном, так и в закаленном состоянии. Качество поверхности, получаемой в последнем случае сравнимо со шлифованной. Таким образом, проанализировав существующие методы зарубежных исследований с исследованиями авторов этой статьи, мы пришли к выводу, что при прогнозировании шероховатости при высокоскоростном фрезеровании сложных поверхностей на предварительных этапах обработки эффективно использование геометрических моделей [54]. По мере улучшения качества перспективно перейти к использованию вейвлет функций, а на предельных финишных операциях – рассматривать поверхность как стохастический процесс и моделировать шероховатость поверхности с использованием интегрального квадратичного функционала. Такой подход к моделированию шероховатости поверхностей сегодня развивают на кафедре «Технологи машиностроения и металлорежущих станков» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» [55, 56].

Список литературы: 1. *Benardos P.G.* Predicting surface roughness in machining: a review./ *P.G. Benardos, G.C. Vosniakos*// International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. – №3. – pp. 833-844. 2. *DIN4760*, Form Deviations; Concepts; Classification System, Deutches Institut Fuer Normung, e.V., 1982. 3. *Boothroyd G.* Fundamentals of Machining and Machine Tools/ *G. Boothroyd, W.A. Knight*. – New York: Marcel Dekker, 1988. – 542 p. 4. *Grzesik W.* A revised model for predicting surface roughness in turning./ *W. Grzesik*// Wear. – 1996. – №194. – pp. 143-148. 5. *Lin S.C.* A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning./ *S.C. Lin, M.F. Chang*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – №38. – pp. 763-782. 6. *Baek D.K.* Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model./ *D.K. Baek, T.J. Ko, H.S. Kim*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – №41. – pp. 451-462. 7. *Chen C.-C.A.* A surface topography model for automated surface finishing./ *C.-C.A. Chen, W.-C. Liu, N.A. Duffie*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1998. – №38. – pp. 543-550. 8. *Ehmann K.F.* A generalized model of the surface generation process in metal cutting./ *K.F. Ehmann, M.S. Hong*// CIRP Annals. – 1994. – №43. – pp. 483-486. 9. *Kim B.H.* Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method./

B.H. Kim, C.N. Chu// Computer Aided Design. – 1999. – №31. – pp. 485-494. **10.** Lee K.Y. Simulation of the surface roughness and profile in high speed end milling./ K.Y. Lee, M.C. Kang, Y.H. Jeong and athter.// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №113. – pp. 410-415. **11.** Abouelatta O.B. Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations./ O.B. Abouelatta, J. Madl// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №118. – pp. 269-277. **12.** Ghani A.K. Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool./ A.K. Ghani, I.A. Choudhury// Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – №127. – pp. 17-22. **13.** Jang D.Y. Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning./ D.Y. Jang, Y.G. Choi, H.G. Kim, A. Hsiao// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1996. – №36. – pp 453-464.

14. Beggan C. Using acoustic emission to predict surface quality./ C. Beggan, M. Woulfe, P. Young, G. Byrne// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 1999. – №15. – pp. 737-742. **15.** Dhar N.R. The influence of cryogenic cooling on tool wear, dimensional accuracy and surface finish in turning AISI 1040 and E4340C steels./ N.R. Dhar, S. Paul, A.B. Chattopadhyay// Wear. – 2001. – №249. – pp. 932-942. **16.** Munoz-Escalona P. Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel./ P. Munoz-Escalona, Z. Cassier// Wear. – 1998. – №218. – pp. 103-109. **17.** Thiele J.D. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel./ J.D. Thiele, S.N. Melkote// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №94. – pp. 216-226. **18.** Baptista R. Three and five axis milling of sculptured surfaces./ R. Baptista, J.F. Antune Simoes// Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – №103. – pp. 398-403. **19.** Coker S.A. In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system./ S.A. Coker, Y.C. Shin// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1996. – №36. – pp. 411-422. **20.** Diniz A.E. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process./ A.E. Diniz, J.C. Filho// Wear. – 1999. – №232. – pp. 67-75. **21.** Heisel U. Vibrations and surface generation in slab milling./ U. Heisel// CIRP Annals. – 1994. – №43. – pp. 337-340. **22.** Garcia-Diaz A. Principles of Experimental Design and Analysis. / A. Garcia-Diaz, D.T. Phillips. – London: Chapman and Hall, 1995. – 409 pp. **23.** Myers R.H. Response Surface Methodology, Process and Product Optimization Using Designed Experiments./ H. Myers, D.C. Montgomery. – New York: Wiley, 1995. –710 pp. **24.** Ross P.J. Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design./ P.J. Ross. – New York: McGraw-Hill, 1996. – 329 pp. **25.** Davim J.P. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments./ J.P. Davim// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №116. – pp. 305-308. **26.** Choudhury I.A. Surface roughness in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments./ I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie// Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – №67. – pp. 55-61. **27.** Feng C.X.J. Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning./ C.X.J. Feng, X. Wang// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2002. – №20. – pp. 348-356. **28.** Kopac J. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product./ J. Kopac, M. Bahor// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №92-93. – pp. 381-387. **29.** Kopac J. Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold preformed steel workpieces./ J. Kopac, M. Bahor, M. Sokovic// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 707-716. **30.** Thomas M. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process./ M. Thomas, Y. Beauchamp, A.Y. Youssef, J. Masounave// Computers in Industrial Engineering. – 1996. – №31. – pp. 637-644. **31.** Alauddin M. Computer-aided analysis of a surface roughness model for end milling./ M. Alauddin, M.A. El-Baradie, M.S.J. Hashmi// Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – №55. – pp. 123-127. **32.** Alauddin M. Optimization of surface finish in end milling inconel 718./ M. Alauddin, M.A. El-Baradie, M.S.J. Hashmi// Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №56. – pp. 54-65. **33.** Fuh K.H. A proposed statistical model for surface quality prediction in end milling of Al alloy./ K.H. Fuh, C.F. Wu// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1995. – №35. – pp. 1187-1200. **34.** Mansour A. Surface roughness model for end milling: a semi-free cutting carbon casehardening steel (EN32) in dry condition./ A. Mansour, H. Abdalla// Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – №124. – pp. 183-191. **35.** Faussett L. Fundamentals of Neural Networks, Prentice-Hall

International Editions./ *L. Fausest*. – NJ.: Englewood Cliffs, 1994. – 461 pp. **36.** *Nauck D.* Foundations of Neuro-Fuzzy Systems./ *D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse*. –New York: Wiley, 1997. – 305 pp. **37.** *Рутковская Д.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы./ *Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский*. – М.: Горячая Линия - Телеком, 2007. – 452 с. **38.** *Кружлов В.В.* Интеллектуальные информационные системы: компьютерная поддержка систем нечеткой логики и нечеткого вывода./ *В.В. Кружлов, М.И. Дли*. – М.: Физматлит, 2002. – 256 с. **39.** *Mitchell M.* An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press./ *M. Mitchell*. – MA.: Cambridge, 1999. – 209 pp. **40.** *Azouzi R.* On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion./ *R. Azouzi, M. Guillot*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1997. – №37. – pp. 1201-1217. **41.** *Varghese S.* A multi sensor approach to inprocess monitoring of surface roughness./ *S. Varghese, V. Radhakrishnan*// Journal of Materials Processing Technology. – 1994. – №44. – pp. 353-362. **42.** *Chien W.T.* The predictive model for machinability of 304 stainless steel./ *W.T. Chien, C.Y. Chou*// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №118. – pp. 442-447. **43.** *Suresh P.V.S.* A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model./ *P.V.S. Suresh, P. Venkateswara Rao, S.G. Deshmukh*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 675-680. **44.** *Lee B.Y.* An investigation of modeling of the machining database in turning operations./ *B.Y. Lee, Y.S. Tarn, H.R. Lii*// Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – №105. – pp. 1-6. **45.** *Li X.P.* A hybrid machining simulator based on predictive theory and neural network modeling./ *X.P. Li, K. Inkaran, A.Y.C. Nee*// Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – №89-90. – pp. 224-230. **46.** *Oxley P.L.B.* Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood./ *P.L.B. Oxley*. – UK.: Chichester, 1989. – 242 pp. **47.** *Lin W.S.* Modeling the surface roughness and cutting force for turning./ *W.S. Lin, B.Y. Lee, C.L. Wu*// Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – №108. – pp. 286-293. **48.** *Matsumura T.* An evaluation approach of machine tool characteristics with adaptive prediction./ *T. Matsumura, H. Sekiguchi, E. Usui*// Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – №62. – pp. 440-447. **49.** *Benardos P.G.* Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments./ *P.G. Benardos, G.C. Vosniakos*// Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – 2002. – №18. – pp. 343-354. **50.** *Tsai Y.H.* An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations./ *Y.H. Tsai, J.C. Chen, S.J. Lou*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1999. – №39. – pp. 583-605. **51.** *Lou S.J.* In-process surface recognition of a CNC milling machine using the fuzzy nets method./ *S.J. Lou, J.C. Chen*// Computers in Industrial Engineering. – 1997. – №33. – pp. 401-404. **52.** *Chen J.C.* Fuzzy-net-based multilevel in-process surface roughness recognition system in milling operations./ *J.C. Chen, M. Savage*// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2001. – №17. – pp. 670-676. **53.** *Ho S.-Y.* Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system./ *S.-Y. Ho, K.-C. Lee, S.-S. Chen, S.-J. Ho*// International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. – №42. – pp. 1441-1446. **54.** *Добротворский С.С.* High speed machining – современный метод механической обработки./ *С.С. Добротворский, Е.В. Иващенко*// Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2010 – №24. – с. 3-8. **55.** *Добротворский С.С.* Шероховатость поверхности и контроль ее качества./ *С.С. Добротворский, А.С. Мазманивили Л. Г. Добровольская* // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2006 – №18. **56.** *Добротворский С.С.* Теоретический анализ и контроль шероховатости шлифованных поверхностей. / *С.С. Добротворский, А.С. Мазманивили Л. Г. Добровольская* // Технологии в машиностроении; под ред. Ю.В. Тимофеева. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2007. – №1. – с. 32-39.

Поступило в редколлегию 1.09.10