

щим корпуса с закрепленным на нем фигурным ножом с двумя боковыми режущими кромками и взаимодействующих с упомянутым ножом двух боковых ножей, неподвижно закрепленных на каретке (рисунок 10).

Механизм резания может быть выполнен в виде перемещающегося по вертикальным направляющим корпуса с клинообразным отрезным ножом и рейкой, а также кинематически связанного с отрезным ножом надрезающим со ступенчато расположенными зубьями ножом, закрепленным на ползун-рейке, смонтированной с возможностью горизонтального перемещения в направляющих установленного на каретке суппорта.

Достоинства: конструктивное выполнение летучей пилы для резки движущегося проката позволит уменьшить габариты и металлоемкость. Недостатки: ограниченный сортамент гнутого профиля (только открытый гнутый профиль).

В представленном обзоре мы рассмотрели лишь малую часть исследований в области отрезки гнутых профилей. За последнее десятилетие значительно увеличилась область изучения и внедрения основного профилировочного и вспомогательного оборудования. Техника совершенствуется, но вопросы, связанные с повышением качества готовой продукции, минимизацией дефектов, снижением затрат и модернизацией оборудования остаются актуальными. В связи с выше изложенным материалом остается очевидной необходимость совершенствования существующих и изыскания прогрессивных методов разделения движущихся профилей.

Литература

1. Летучая пила для резки движущегося проката: пат. 2291034 Рос. Федерация: МПК⁷ B23D61/04, В.Н. Баранов, В.В. Бедняков, В.Ф. Разин; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Электростальский завод тяжелого машиностроения" – 2005102311/02; заявл. 10.07.2006; опубл. 10.01.2007, – 4 с.
2. Устройство для резки профилей: пат. 2021083 Рос. Федерация: МПК⁵ B23D25/06 П.М. Финагин, В.С. Грушин, Н.П. Рябихин; заявитель и патентообладатель: Производственное объединение «Электростальтяжмаш». – 5019818/27; заявл. 23.12.1991; опубл. 15.10.94, Бюл. № 27 (II ч.). – 3 с.
3. Штамп для резки профильного материала: пат. 2133658 Рос. Федерация: МПК⁶ B23D23/00, В.Д. Осипов, И.В. Соколов, В.А. Боровой; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество открытого типа "Череповецкий сталепрокатный завод" – 97119608/02; заявл. 26.11.1997; опубл. 27.07.99, Бюл. № 14-2003. – 7 с.
4. Инструмент летучих ножниц для разделения гнутых профилей: пат. 2149082 Рос. Федерация: МПК⁷ B23D35/00, B23D25/00 В.Д. Осипов, И.В. Соколов; заявитель и патентообладатель: Акционерное общество открытого типа "Череповецкий сталепрокатный завод" – 97108115/02; заявл. 27.04.1998; опубл. 20.05.2000, Бюл. № 35-2003. – 3 с.: ил
5. Летучая пила для резки движущегося проката: пат. 2240898 Рос. Федерация: МПК⁷ B23D21/00, B23D25/02 В.Н. Баранов, В.В. Бедняков, В.Ф. Разин, Н.Л. Кокорев; заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество "Электростальский завод тяжелого машиностроения" 2003115167/02; заявл. 23.05.2004; опубл. 27.11.2004, – 6 с.

Способ экспресс-диагностики шероховатости поверхностного слоя деталей машин на основе вероятностной модели со скрытыми состояниями

к.т.н. Паламарь И.Н., Юлин С.С.

РГАТУ имени П.А. Соловьева, ОАО «КБ «ЛУЧ», Рыбинск
+7(4855)21-97-16, irina.palamar@mail.ru, julin.serg@gmail.com

Аннотация. В статье предложен способ экспресс-диагностики шероховатости поверхностного слоя деталей машин и показана его эффективность. Разработана графическая вероятностная модель, обеспечивающая высокое качество диагностики при малом количестве статистических данных. Экспресс-диагностика вы-

полняет определение качества поверхностного слоя на основе классификации профилограмм. Процесс диагностики выполняется как процедура сравнения профилограмм с заранее подготовленными с использованием статистической выборки моделями разных классов шероховатости. Разработана программная реализация модели, выполнено обучение и экспериментально исследована точность диагностики.

Ключевые слова: шероховатость, экспресс-диагностика, графическая вероятностная модель.

Совершенствование технологических процессов изготовления и ремонта деталей машин связано с использованием новых материалов, инструментов, режимов обработки, новых методов достижения требуемых эксплуатационных свойств поверхностного слоя. Свойство шероховатости поверхностного слоя оказывает существенное влияние на такие эксплуатационные свойства деталей как контактную жесткость, износостойкость, усталостную прочность, прочность неподвижных соединений и др. Качество обработанной поверхности также влияет на надёжность и долговечность покрытий, формирование которых является одним из актуальных направлений современных научных и технологических исследований [1].

Шероховатость обработанной поверхности является следствием пластической деформации поверхностного слоя при образовании стружки, копирования неровностей кромок режущего инструмента и трения его о деталь, вибраций, неоднородности материала заготовки и других причин. Поэтому контроль шероховатости, служащий одним из важнейших условий достижения функциональной взаимозаменяемости деталей машин, а также исследование влияющих технологических параметров и свойств новых материалов и покрытий являются актуальными.

Известно более 40 параметров шероховатости. Параметры разделяют на три основные группы: высотные параметры, шаговые, параметры опорной длины. Данные параметры оцениваются по профилограммам, представляющим собой графическое изображение действительного профиля, полученного в результате измерения. Замер и оценка параметров шероховатости может выполняться по профилограмме вручную. Существуют также приборы для экспресс-диагностики шероховатости, позволяющие оперативно получать значения различных наборов параметров шероховатости [2]. При использовании профилометра вычисление всех параметров шероховатости по ГОСТ 2789-73 производится автоматически на основе анализа сигнала, полученного контактным или бесконтактным способом.

В условиях единичного и экспериментального производства анализ шероховатости выполняется вручную сравнительным бесконтактным способом, что является весьма трудоемким процессом, не обладает высокой точностью и требует предварительно подготовленной базы образцов. На основе сравнения полученных параметров с эталонными производится принятие решения о прохождении приемо-сдаточных испытаний той или иной детали. В результате процесс анализа шероховатости является автоматизированным.

На этапе ремонта важной задачей может быть анализ характера изменения параметров шероховатости в процессе эксплуатации деталей, что требует возможности накопления информации о состоянии поверхностного слоя детали в процессе жизненного цикла изделия. На этапе исследований режимов обработки новых материалов и новых технологий для ускорения процесса получения результатов необходимы средства автоматического статистического анализа качества поверхностного слоя. Статистический анализ подразумевает разработку статистической модели профилограммы. В работе нами предлагается разработка такой модели на основе классического подхода к автоматическому построению моделей принятия решений, классификации или прогнозирования на основе эмпирических данных – обучение по прецедентам. Для выполнения обучения необходимо наличие статистической обучающей выборки. На сегодняшний день в открытом доступе не существует статистических баз профилограмм для разных видов материалов и способов обработки. Кроме того, процесс создания новых материалов и совершенствование обрабатываемых технологий подразумевает формирование уникальной для каждого исследования обучающей выборки. Поэтому основ-

ным требованием к разрабатываемой модели является возможность получения высокого качества диагностики состояния поверхностного слоя при малом количестве обучающих данных.

Критериями качества преобразования поверхностного слоя являются достижение заданных значений параметров, измеряемых по профилограмме, и степень однородности шероховатости по всей поверхности детали.

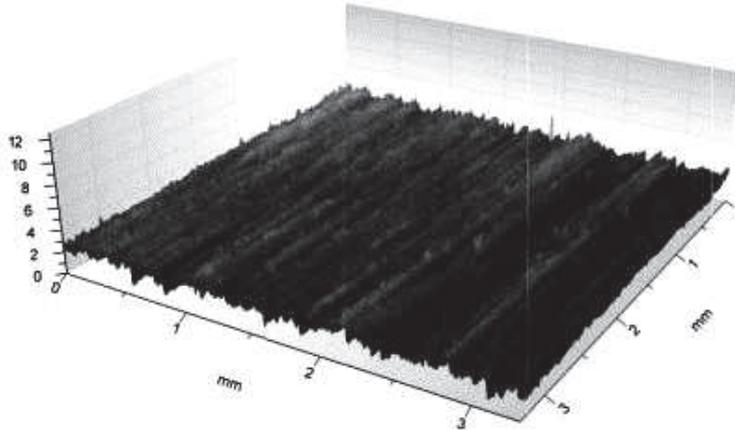


Рисунок 1. 3D-модель поверхности диска ГТД

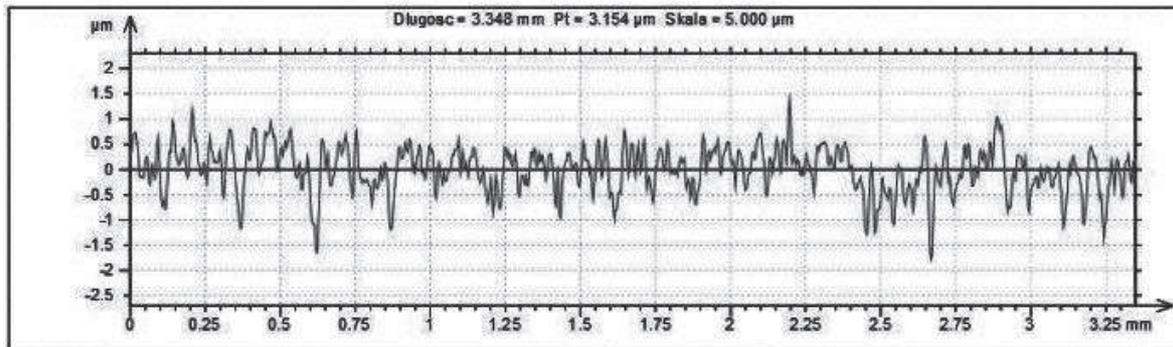


Рисунок 2. Профилограмма поверхности диска ГТД

Получение информации обо всей поверхности исследуемого объекта требует очень длительной и дорогостоящей процедуры измерений. Результаты таких исследований для поверхности диска газотурбинного двигателя (ГТД) приведены в [3] и показаны на рисунке 1 [3] и рисунке 2 [3]. Большое количество измеренных данных и возможность визуализации поверхностного слоя позволяют повысить эффективность исследований, в частности исследований трения, но процесс анализа выполняется вручную и не использует средства интеллектуального анализа данных.

С целью автоматизации процесса проведения контроля и анализа качества поверхностного слоя предложен подход к автоматической классификации типов шероховатости поверхностного слоя детали на основе методов машинного обучения, позволяющий реализовать способ экспресс-диагностики по получаемым сигналам, аналогичный сравнительному визуальному способу контроля шероховатости на основании экспертного мнения.

Профилограмма является последовательностью связанных данных, порожденных одним и тем же процессом. К такому типу данных относятся также речевые и кардиосигналы, для классификации которых успешно применяются методы машинного обучения [4 – 6]. Основным методом является классификация с помощью скрытых Марковских моделей (*Hidden Markov Model* - НММ).

Скрытые Марковские модели относятся к классу порождающих графических моделей. Такие модели строятся для каждого класса и состоят в нахождении параметров распределения вероятностей $p(x)$ (где: x – наблюдаемые данные), наилучшим образом описывающих данные каждого класса. Возможность обучения на малом количестве данных является важной особенностью порождающих моделей и наиболее актуальна в случае длительного или

дорогостоящего процесса получения обучающей выборки [7, 8].

К недостаткам порождающих моделей следует отнести то, что выбор формы функции плотности распределения вероятностей (нормальное, экспоненциальное и т. д.), накладывает ограничения на применимость порождающих моделей, так как не все данные соответствуют тем или иным известным параметрическим семействам распределений вероятностей. Кроме того, так как наблюдаемые данные представляют собой многомерные вектора признаков, то оценка параметров распределений в случае наличия линейных зависимостей среди признаков вектора является затруднительной или невозможной [8, 9].

Таким образом, необходимо разработать новую модель на основе порождающего подхода, свободную от указанных недостатков, методику применения статистического обучения предложенной модели в задаче экспресс-диагностики шероховатости поверхностного слоя и провести экспериментальное исследование способа для решения задачи классификации профилограмм.

Описание способа экспресс-диагностики на основе разработанной графической вероятностной модели

Предлагаемый способ экспресс-диагностики можно рассматривать как аналог бесконтактного метода оценки шероховатости, основанного на визуальном сравнении исследуемого поверхностного слоя с образцами. Основная идея состоит в проведении классификации сигнала, характеризующего характер поверхности. Такой сигнал может быть представлен как зависимость амплитуды A (аналог высоты неровностей) от времени t (аналог координаты положения сканирующего датчика). Пример интерпретации профилограммы в виде непериодического сложного сигнала представлен на рисунке 3, где: T – это аналог базовой длины.

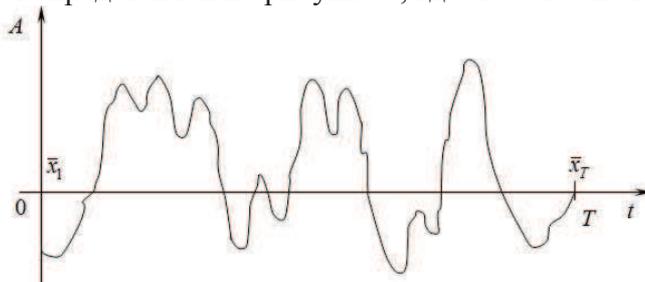


Рисунок 3. Интерпретация профилограммы в виде непериодического сигнала

Перед выполнением самой процедуры классификации обычно выполняется обработка сигнала для дискретизации и выделения признаков для классификации. В случае непериодических сложных сигналов таким методом выделения признаков является метод извлечения кепстральных коэффициентов в мел-шкале – *MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients)*.

Особенностью предлагаемой модели является использование для аппроксимации обучающих данных главных многообразий малой размерности, заданных в виде сетки узлов, сформированной алгоритмом построения самоорганизующихся карт Кохонена. Частью параметров новой модели являются значения узлов аппроксимирующей сетки. Такой набор, как правило, является уникальным для каждого класса $y = 1 \dots c \dots C$ (где: C – количество классов), благодаря чему представляется возможным выполнение классификации на его основе за счет оценки расстояния от классифицируемых данных до сетки узлов соответствующих классов.

Так как предлагаемая модель не предполагает оценки параметров распределения $p(x)$, то целесообразным является описать структуру модели с помощью фактор-графа. Фактор может представлять как условное, так и совместное распределение вероятностей случайных величин, а в общем случае любую функциональную зависимость.

Структура предлагаемой графической вероятностной модели изображена на рисунке 4. В предложенной модели $X^{(y)} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_T\}$ соответствует данным профилограммы, представленным на рисунке 3, а y – класс профилограммы, который может соответствовать виду обработки поверхностного слоя, характеризующему набором параметров.

Совместное распределение переменных предлагаемой модели представляется как про-

извлечение факторов, описываемое следующим выражением:

$$p(\bar{u}, X) = \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) \cdot f(u_t, \bar{x}_t) \tag{1}$$

где: \bar{u} – вектор случайных величин, соответствующих номерам узлов аппроксимирующей сетки каждая случайная величина принимает значение от 1 до количества узлов; $X = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_T\}$ – упорядоченное множество векторов мел-кепстральных коэффициентов (MFCC), характеризующих профилограмму; \bar{x}_t – вектор MFCC; t – номер текущего вектора MFCC; T – длина профилограммы; $p(u_t | u_{t-1})$ – распределение вероятностей перехода между состояниями (между узлами аппроксимирующей сетки); $f(u_t, \bar{x}_t)$ – фактор-функция, определяющая связь между текущим узлом аппроксимирующей сетки и текущим вектором MFCC.

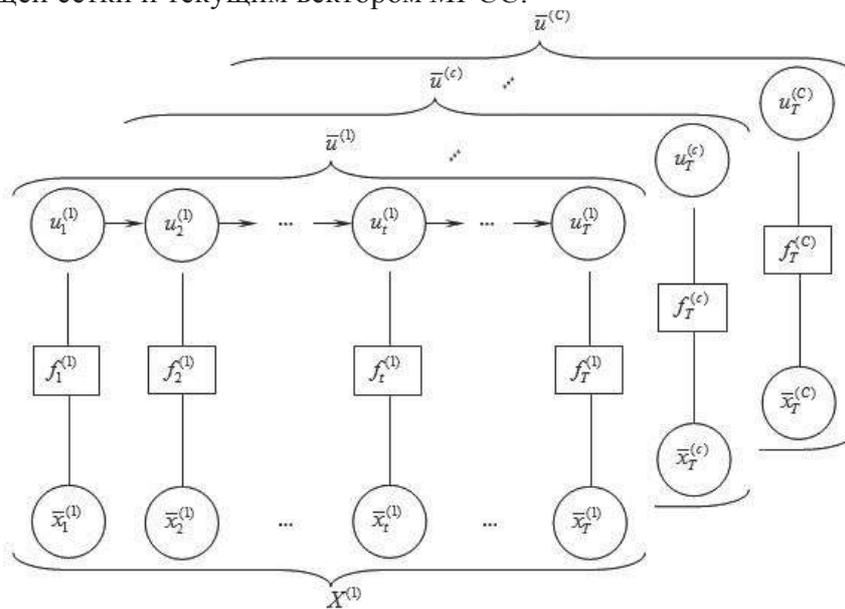


Рисунок 4. Структура новой модели в виде вероятностного фактор-графа (одна модель для каждого класса $y = 1 \dots c \dots C$)

Построение порождающего классификатора на основе графической вероятностной модели классификации сводится к оценке параметров совместного распределения всех случайных величин, заданных на структуре такой модели методом максимального правдоподобия. По факту наибольшего правдоподобия параметров той или иной модели наблюдаемым данным и выполняется процедура классификации.

Обучение представляет собой оптимизацию целевой функции:

$$L(W, A) = \prod_{\forall X \in Z} \prod_{t=1}^T p(u_t | u_{t-1}) f(u_t, \bar{x}_t) \rightarrow \max; \tag{2}$$

где: W – множество значений узлов аппроксимирующей сетки; Z – обучающее множество; L – функция правдоподобия; A – матрица вероятностей переходов между узлами сетки.

Методика реализации предлагаемого способа состоит в следующем. Современные профилометры при измерении параметров шероховатости позволяют получить цифровой сигнал с возможностью сглаживания профилограммы, который может быть передан в компьютер через USB-интерфейс. Для различных режимов обработки определенного материала формируется обучающая выборка. После выполнения MFCC преобразования проводится обучение модели. Процесс диагностики выполняется как процедура сравнения профилограмм с заранее подготовленными с использованием статистической выборки моделями разных классов шероховатости. В режиме диагностики производится классификация предъявляемого сигнала, по результатам которой и принимается решение о соответствии параметров шероховатости определенному качеству обработки поверхности.

Результаты экспериментального исследования

Для экспериментального исследования предложенной модели были использованы данные, полученные в [10]. Виды профилограмм для различных режимов обработки диска ГТД приведены на рисунке 5 [10], где 1 – после эксплуатации (Ra 0,962); 2 – после полировки (Ra 0,498); 3 – после гидродробеструйной обработки стеклошариками (Ra 0,710); 4 – после гидрореспектоструйной обработки (Ra 0,772); 5 – после гидроабразивной обработки зерном 24А6 (Ra 1,014); 6 – после абразивной обработки зерном 24А12 (Ra 1,692).

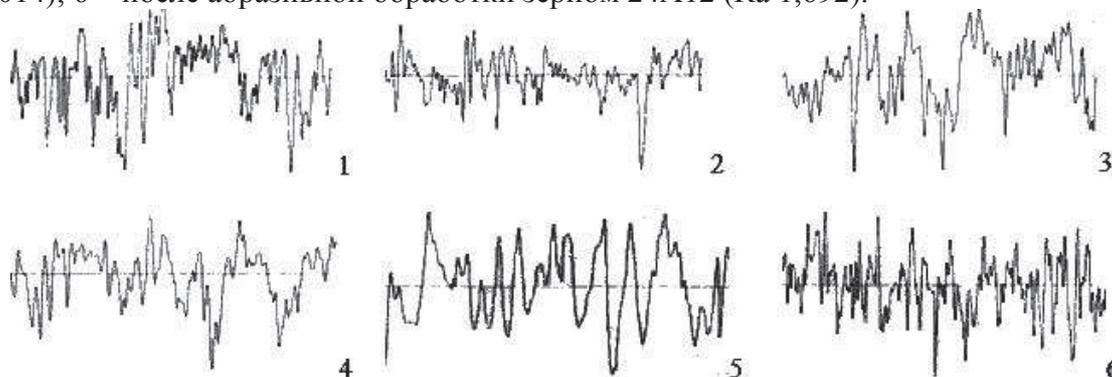


Рисунок 5. Профилограммы различных классов шероховатости поверхности диска ГТД

В ходе эксперимента для оценки качества классификации типов профилограмм был использован метод *MFCC*-преобразования для извлечения спектральных коэффициентов. Извлечение мел-кепстральных коэффициентов производилось в окне 0,25 мм с перекрытием 0,10 мм. Всего было получено 13 коэффициентов для каждого окна. Тем самым профилограмма была преобразована в последовательность наблюдений $X_i^{(y)} = \{\bar{x}_1^{(y)}, \bar{x}_2^{(y)}, \dots, \bar{x}_T^{(y)}\}$, где: T – длина профилограммы, \bar{x} – 13-ти мерный вектор мел-кепстральных коэффициентов.

В полученном пространстве признаков было произведено обучение предложенной графической вероятностной модели. Размер карты Кохонена составил 32×32 узла. Обучение длилось 200 эпох. В эксперименте было использовано 6 классов профилограмм по 10 экземпляров для каждого класса. На тестовых экземплярах классификатор показал 99 % точность классификации по показателю *F*-меры.

Оценка критерия однородности поверхностного слоя для детали связана с необходимостью анализа шероховатости на нескольких участках с последующим усреднением. Например, при проведении приемо-сдаточных испытаний диска ГТД производится серия замеров шероховатости поверхности и построение соответствующих профилограмм. При соотнесении результатов всех замеров к одному классу шероховатости принимается решение о прохождении приемо-сдаточных испытаний. Поскольку шероховатость – это совокупность неровностей профиля с относительно небольшим шагом, взятых на небольшом участке, то существует проблема выбора таких участков и определения оптимального их количества для получения адекватной оценки. Статистический подход к классификации на основе предложенной модели позволит повысить достоверность принятия решения о степени однородности шероховатости поверхностного слоя детали.

Заключение

Исходя из экспериментальных результатов, можно сделать вывод, что предложенная модель может быть успешно использована для классификации типов шероховатости поверхности по профилограммам. В отличие от *НММ* предложенная модель требует меньшее количество обучающих данных для достижения высокого качества классификации, что положительно сказывается на времени проведения диагностики поверхности деталей машин при исследовании новых материалов и методов обработки, избавляя от процесса формирования объемной обучающей выборки.

Предложен подход к оценке однородности шероховатости поверхностного слоя как решение задачи классификации профилограммы на основе графической вероятностной модели.

Предложенный способ экспресс-диагностики основан на технологии интеллектуально-

го анализа данных и, следовательно, предоставляет широкие возможности для повышения эффективности процесса контроля в условиях экспериментального производства. Используемая математическая модель позволяет формировать принципиально новые статистические базы производственной и технологической информации, обеспечивая возможность выявления соответствующих классов для различных особенностей техпроцессов и установление новых взаимосвязей.

Литература

1. Andreato, R.V. ECG signal analysis through hidden Markov models / R.V. Andreato, B. Dorizzi, J. Boudy // Biomedical Engineering, IEEE Transactions. – 2006. – Vol. 53, Iss. 8. – P. 1541 – 1549.
2. Bishop, C. Pattern Recognition and Machine Learning. / C. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
3. Liang, P. An asymptotic analysis of generative, discriminative, and pseudo-likelihood estimators/ P. Liang, M. I. Jordan // In Proceedings of the 25th International Conference on Machine Learning (ICML). – 2008.
4. Rohlicek, J. R. Continuous hidden markov model for speaker independent word spotting/ J. R. Rohlicek, W. Russell, S. Roukoud, H. Gish // International Conference on Audio, Speech and Signal Processing. – 1989. – Vol. 1 – p. 627 – 630.
5. Xue, J.-H. Comment on "discriminative vs. generative classifiers: a comparison of logistic regression and naive Bayes" / J.-H. Xue, D.M. Titterington // Neural Processing Letters. – 2008. – Vol. 28, Iss. 3. – P. 169 – 187.
6. Yun-Hsuan Sung, Boullis C., Manning C., Jurafsky D. Regularization, adaption, and non-independent features improve hidden conditional random fields for phone classification. // Automatic Speech Recognition & Understanding. Kyoto. 2007. P. 347 – 352.
7. Исследование эксплуатационной повреждаемости лопаток компрессора ГТД и разработка технологии их ремонта на основе упрочняющих методов обработки: автореф. дис. канд. техн. наук / Румянцева Н.В.: – Рыбинск, 2009.
8. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин/ А. М. Сулима, Ю. Д. Шулов: М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
9. Приборы неразрушающего контроля *Techno-NTD*. Измерители шероховатости, профилометры [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <http://t-ndt.ru/index.php?id=65>.
10. Проведение экспериментальных исследований образцов, выполненных из материала ЭП 612, на машине трения Т-11/ В. Ф. Безъязычный, М. Щерек, А. Н. Сутягин: Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. Рыбинск, 2013. – № 1 – с. 84 – 90.

Разработка технологических процессов раскроя металлопроката холодноштамповочного производства с использованием прогрессивных методов математического моделирования

к.т.н. Мищенко О.В., Федорина Е.В.

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск
8(8422)417888, ovm.omd@mail.ru

Аннотация. Представлен теоретический анализ методов оптимизации затрат штамповочного производства.

Ключевые слова: оптимизация, раскрой, коэффициент использования металла

В холодноштамповочном производстве (ХШП) кузовных деталей автомобилей металлоемкость определяется расходом листового металлопроката, рассчитанным в натуральном (норма расхода в килограммах, тоннах) и стоимостном выражении (расход металла в рублях на единицу продукции).

В современных конкурентных условиях проблема снижения металлоемкости и экономного потребления металла не потеряла своей актуальности, к тому же ускорились темпы ре-