

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«Харківський політехнічний інститут»

Ministry of Education & Science of Ukraine  
National Technical University  
«Kharkiv Polytechnic Institute»

1'2016

ВИСОКІ ТЕХНОЛОГІЇ  
В МАШИНОБУДУВАННІ

HIGH TECHNOLOGIES  
IN MACHINE ENGINEERING

Збірник наукових праць

Printed scientific works

Харків НТУ «ХПІ» – 2016 – Kharkiv NTU «KhPI»

ББК 34.63

УДК 621.91

Державне видання  
Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України  
КВ № 7839 від 8 вересня 2003 року

Друкується за рішенням Вченої Ради НТУ "ХПІ"

Редакційна колегія:

*Пижов І. М., д.т.н. (відповідальний редактор),  
Пупань Л. І., к.т.н. (зам. відповідального редактора),  
Доброскок В. Л., д.т.н., Залога В. О., д.т.н., Зубар В. П., проф.,  
Мовшиович О. Я., д.т.н., Пермяков О. А., д.т.н., Тимофієв Ю. В. д.т.н.,  
Турманідзе Р. С., д.т.н., Узунян М. Д., д.т.н., Фадєєв В. А., д.т.н.,  
Федорович В. О., д.т.н., Крюкова Н.В. (відповідальний секретар)*

У збірнику представлені наукові статті, присвячені актуальним питанням, що належать до сфери високопродуктивних ресурсозберігаючих технологій формоутворення різних виробів із застосуванням сучасного обладнання та прогресивних інструментів. Акцентовано увагу на оригінальних методиках і сучасних вимірювальних приладах для вивчення фізики досліджуваних процесів. Порушено також питання оптимізації, математичного та комп'ютерного моделювання в машинобудуванні.

Для фахівців в області машинобудування, науково-технічних працівників і студентів.

**Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. –**  
Харків, НТУ «ХПІ», 2016. – Вип. 1 (26). – 136 с.

В сборнике представлены научные статьи, посвященные актуальным вопросам, относящимся к области высокопроизводительных ресурсосберегающих технологий формообразования различных изделий с применением современного оборудования и прогрессивных инструментов. Акцентируется внимание на оригинальных методиках и современных измерительных приборах для изучения физики исследуемых процессов. Затронуты также вопросы оптимизации, математического и компьютерного моделирования в машиностроении.

Для специалистов в области машиностроения, научно-технических работников и студентов.

**ББК 34.63**

Матеріали відтворено з авторських оригіналів

ББК 34.63

УДК 621.91

© НТУ «ХПІ», 2016

УДК 004.932.2

Ю.И. Бабич, канд. техн. наук, Н.И. Бабич, канд. техн. наук,  
А.А. Якимов, д-р техн. наук, Л.В. Бовнегра, канд. техн. наук,  
Одесса, Украина

## **МОДЕЛЬ ПОИСКА ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СИГНАЛОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

*У статті проаналізовано причинно-наслідкові сигнали в наборі статичних зображень. Побудовано класифікатор пошуку, який забезпечує стан часових характеристик при пошуку причинного напрямку між парами випадкових величин і використовується для ефективного пошуку відмінності між особливостями об'єктів і особливостями їх контекстів у наборі статичних зображень.*

**Ключові слова:** зображення, причинно-наслідковий зв'язок, об'єкт, контекст, причинна характеристика об'єкта, безпричинна характеристика об'єкта, класифікатор

*В статье проанализированы причинно-следственные сигналы в наборе статических изображений. Построен поисковик-классификатор, который обеспечивает состояния временных характеристик при поиске причинно-следственного направления между парами случайных величин и используется для эффективного поиска отличия между особенностями объектов и особенностями их контекстов в наборе статических изображений.*

**Ключевые слова:** изображение, причинно-следственная связь, объект, контекст, причинная характеристика объекта, беспричинная характеристика объекта, классификатор

*The article analyzes causal signals in the set of static images. Built a search engine, a classifier that provides the status of temporal search for the causal direction between pairs of random variables and is used to efficiently find the differences between the features of objects and their contexts in the set of static images.*

**Keywords:** image, causation, object, context, causal characteristics of the object, nameless object description, classifier

Изображения, сделанные различными оптико-электронными системами и зарегистрированные с помощью разнообразных приёмников искажаются действием помех. Искажения изображения вносятся разными компонентами отображающего прибора и называются электронный шум. Помехи затрудняют визуальный анализ изображения и его компьютерную обработку.

В качестве примера в статье рассмотрено изображение моста над рекой, по которому едет автомобиль по правой полосе. Вопрос: «*Есть ли автомобиль на изображении?*»

Чаще всего для ответа на подобные вопросы используются алгоритмы усиления взаимосвязи между пикселями и характеристиками изображения. При анализе изображения необходимо учитывать, как оно будет изменяться при разного рода вмешательствах. В данной статье в качестве вмешательства используется удаление объекта.

С этой целью рассмотрены два гипотетических вопроса: «*Как бы выглядело бы изображение, если убрать автомобиль?*» и «*Как бы выглядело изображение, если убрать мост?*». В первом случае можно утверждать, что другие детали изображения (река, мост) останутся такими же, если автомобиль убрать. С другой стороны, при втором вмешательстве, если убрать мост, то нет смысла в автомобиле, подвешенном над рекой. Таким образом, удаление моста с изображения отразится на автомобиле, находящемся на нём. На основании этого возникает другой вопрос: «*Почему на этом изображении есть автомобиль?*».

Ответ заключается в причинно-следственных связях между мостом и автомобилем [1].

Причинные характеристики – это те, что являются причиной наличия интересующего нас объекта на изображении (то есть те особенности, которые обуславливают причину метки класса объекта), в то время как непрчинные характеристики вызваны присутствием объекта на изображении (то есть, вызваны меткой класса объекта).

Существует вероятность того, что объект на изображении распространяет ассиметричные причинные связи. Эти причинные связи могут существенно отличаться от тех, которые используют современные алгоритмы компьютерной обработки изображений. Например, большинство изображений с автомобилем содержат дорогу. Таким образом, в данном случае, характеристики автомобилей и характеристики дорог будут взаимосвязаны, и, следовательно, характеристики дорог частично характеризуют автомобиль, что является независимыми одинаковыми распределениями (НОР) настроек [1]. Однако, должен ли автомобиль, тонущий в реке, получить низкую «оценку автомобиля» от предложенного алгоритма распознавания объектов, если это нестандартный контекст? Ответ зависит от применения. Если цель – максимизировать среднюю оценку распознавания объекта в тестовом наборе, который имеет то же распределение, что и тренировочный набор, тогда нужно использовать контекст принятия решения. Цель данной статьи – исследовать не НОР ситуации, которые требуют вмешательства.

Существующие алгоритмы распознавания объектов предоставляют неполную информацию о причинно-следственных связях между характеристиками изображения. По этим причинам, обнаружение причинно-следственных сигналов в изображениях представляет большой интерес.

При отсутствии каких-либо предположений, определение причинных связей между случайными величинами искомых объектов из их совместного распределения в принципе невозможно [2]. В частности, любое совместное распределение по двум случайным величинам  $A$  и  $B$  согласуется с любой из следующих трех причинно-следственных структур:  $A$  вызывает  $B$ ,

$B$  вызывает  $A$ , и  $A$  и  $B$  вызваны ненаблюдаемым фактором  $C$ , влияющим на результат [1].

В реальных ситуациях в совместных распределениях разные причинные интерпретации могут происходить с неодинаковой вероятностью. Эти данные используются для построения классификатора определения причинно-следственных связей между двумя случайными переменными из их совместного распределения.

Эксперименты показали, что статистика наборов данных более высокого порядка указывает на причинно-следственные отношения.

Введём предположение, что причинные характеристики объекта и беспричинные характеристики тесно связаны между собой. Характеристики контекста и причинные характеристики не должны быть обязательно связаны между собой. Эмпирические доказательства в поддержку предположения подтверждаются причинно-следственной связью и наличием отличий между объектами и их контекстами.

$f \sim P_f$	$f \sim P_f$
for $j = 1, \dots, m$ do	for $j = 1, \dots, m$ do
$x_j \sim P_c$	$y_j \sim P_c$
$e_j \sim P_c$	$e_j \sim P_c$
$y_i \leftarrow f(x_j) + e_j$	$x_i \leftarrow f(y_j) + e_j$
end for	end for
returns $S = \{(x_j, y_j)\}_{j=1}^m$	returns $S = \{(x_j, y_j)\}_{j=1}^m$
Модель, где $X \rightarrow Y$	Модель, где $X \leftarrow Y$

Рисунок 1 – Дополнительные причинно-следственные модели шума

Наилучшим образом для изучения причинно-следственных связей служат смешанные эксперименты как стандарт причинного вывода [2]. Однако, в большинстве случаев, эксперименты являются финансово затратными. В таких ситуациях, мы должны различать причины и следствия только по данным наблюдений без возможности вмешательства [3]. Это область наблюдательного причинного логического вывода.

В своей простейшей форме, наблюдательные причинные логические выводы [2, 3] рассматривают данные наблюдений и стремятся сделать вывод в случаях  $X \rightarrow Y$  или  $Y \rightarrow X$ .

$$Q = \{(x_i, y_j)\}_{j=1}^m \sim P^m(X, Y). \quad (1)$$

В частности, предполагается, что  $Q$  принадлежит одной из двух моделей: причинной модели, где  $X \rightarrow Y$  или беспричинной модели, где  $Y \rightarrow X$ . Рис. 1 иллюстрирует такие модели [2], в которых переменной действия является шумовая реализация нелинейной функции от переменной причины. Если не делаются предположений о распределении  $P_f$ ,  $P_c$ , и  $P_e$ , представленная на рис. 1 проблема наблюдения причинно-следственных отношений не идентифицируется [3]. Для решения этой проблемы, мы предполагаем, что всякий раз, если  $X \rightarrow Y$ , то причины, шумы и механизмы взаимно независимы. Первая независимость между причиной и механизмом (НПМ) [1, 4], которая оформляется не как независимость между вводимой переменной  $x$  и механизмом  $f$ , а как независимость между источником данных (то есть, распределением  $P(X)$  и механизмом  $P(Y|X)$ , отображая причину действия. Это может быть оформлено или с помощью вероятности, или с точки зрения алгоритмической сложности [1]. Вторая независимость – между причиной и шумом. Это стандартное предположение в моделировании структурных уравнений, и это связано с причинной достаточностью. Если это предположение нарушено, то в причинную модель необходимо включить дополнительные переменные [2].

Для большинства вариантов ( $P_c$ ,  $P_e$ ,  $P_f$ ) НПМ будут нарушены в не причинной области. Это нарушение связано со статистической обработкой, когда исходя из наблюдений, причины и следствия являются разными. Существует несколько типов причинных следов.

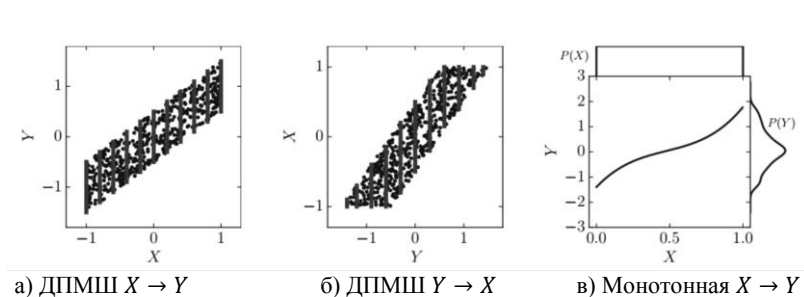


Рисунок 2 – Примеры причинных следов

Во-первых, в линейной аддитивной шумовой модели  $Y \leftarrow f(X) + E$ , где  $X$  – причина,  $E$  – шум, эти переменные являются независимыми случайными величинами с ограниченным диапазоном, и механизм  $f$  является линейной функцией. (Рис. 2а). Невозможно представить линейную аддитивную шумовую модель  $X \leftarrow f'(Y) + E'$ , где новая причина  $Y$  и новый шум  $E'$  – две независимые случайные величины (за исключением вырожденных случаев). Это представлено на рис. 2б, где дисперсия новой переменной шума  $E'$

появляется в разных местах новой переменной причины  $Y$  и обозначается красными линиями. Таким образом, в НПМ допущение удовлетворяет корректному направлению причины  $X \rightarrow Y$ , но оно нарушается при неправильном причинном направлении  $X \leftarrow Y$ . Благодаря этой асимметрии, причины отличаются от следствий [5]. Важным моментом здесь является отсутствие зависимости между  $X$  и  $E^2$ .

Во-вторых, при  $X \rightarrow Y$ , где  $f$  – это монотонная функция, и где  $Y = f(X)$  детерминировано. Причинно-следственная связь  $X \rightarrow Y$  является детерминированной, и поэтому следы, основанные на шуме, из предыдущих примеров являются бесполезными. Предположим, что  $P(X)$  – это равномерное распределение. Тогда функция вероятности плотности воздействия  $Y$  возрастает каждый раз, когда наклон  $f$  убывает, как показано на рис. 2в. Форма воздействия распределения  $P(Y)$  зависима от механизма  $f$ . В данном примере НПМ удовлетворяет корректному причинному направлению  $X \rightarrow Y$ , но оно нарушается при неверном причинном направлении  $X \leftarrow Y$ . Следовательно, из-за данной асимметрии, понятия причины и следствия различны [1].

Чтобы изучить причинные следы из данных, мы следуем [3] и представляем причинно-следственные логические выводы в виде двоичной задачи классификации. Наши входные модели  $Q_i$  – это эффективные графики рассеивания, похожие на те, что были показаны на рис. 2а и 2б, то есть каждая точка данных представляет собой набор образцов  $(x_{ij}, y_{ij}) \in R^2$ , обращенных НОР из распределения  $P(X_i, Y_i)$ . Метка класса  $l_i$  указывает на причинно-следственное направление между  $X_i$  и  $Y_i$ .

$$\begin{aligned}
 D &= \{(S_i, l_i)\}_{i=1}^n, \\
 Q_i &= \{(x_{ij}, y_{ij})\}_{j=1}^{m_i} \sim P^{m_i}(X_i, Y_i), \\
 l_i &= \begin{cases} 0 & \text{if } X_i \rightarrow Y_i \\ 1 & \text{if } X_i \leftarrow Y_i \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

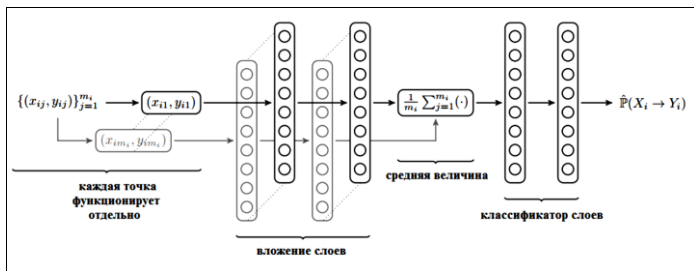


Рисунок 3 – Схема нейронной причинной обусловленности коэффициента (NCC-архитектура)

Используя данные из этой формулы, необходимо обучить нейронную сеть систематизировать выборки из распределений вероятности на причинные и не причинные. Так как входные модели  $Q_i$  являются не фиксированными мерными векторами, а набором точек, что описывает его, как вложенный классификатор [4].

$$NCC \left( \{(x_{ij}, y_{ij})\}_{j=1}^{m_i} \right) = \Psi \left( \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} \varphi(x_{ij}, y_{ij}) \right). \quad (3)$$

В предыдущем уравнении,  $\varphi$  – это карта особенности, и средний показатель всех  $\varphi(x_{ij}, y_{ij})$  – это среднее внедрение эмпирического распределения  $\frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^{m_i} \delta_{(x_{ij}, y_{ij})}$ . Функция  $\psi$  – это бинарный классификатор, принимающий фиксированную длину среднего вложения как входящую [3].

В методах ядра,  $\varphi$  фиксируется априорно и определяется с учетом нелинейного ядра [3]. Однако, наша карта особенностей  $\varphi: R^2 \rightarrow R^h$  и классификатор  $\psi: R^h \rightarrow \{0,1\}$  – оба многослойные перцептроны, которые изучаются совместно с данными. Рис. 3 иллюстрирует предложенную архитектуру, который называется нейронный коэффициент причинности (НКП). Чтобы классифицировать образец  $Q_i$  как причинный или не причинный, НКП располагает каждую точку  $(x_{ij}, y_{ij})$  в образце  $Q_i$  для представления  $\varphi(x_{ij}, y_{ij}) \in R^h$ , рассчитывает встроенный вектор  $\frac{1}{m_i} \sum_{i=1}^{m_i} \varphi(x_{ij}, y_{ij})$  по всем точкам  $(x_{ij}, y_{ij}) \in Q_i$  и классифицирует встроенный вектор  $\varphi S_i \in R^h$  как причинный или не причинный, используя классификатор нейронных сетей  $\psi$ . Важно, что предложенная нейронная архитектура не ограничивается причинно-следственными умозаключениями и может быть использована для представления и изучения в общих распределениях.

НКП имеет положительные свойства. Во-первых, прогнозирование причинно-следственных связей для нового набора образцов во время теста может быть эффективно завершено с единственным проходом через статистическую сеть. В отличие от вычислительной сложности аддитивной модели шума алгоритмов вывода, основанной на ядре, является кубической в числе образцов  $m_i$ . Во-вторых, НКП могут быть обучены использованию сочетаний разных причинных и беспричинных генеративных моделей, таких как линейные, нелинейные, шумовые и детерминированные механизмы, связывающие причины с их следствием. В-третьих, для дифференцируемых функций активации, НКП – это дифференциальная функция, что позволяет размещать НКП в больших нейронных архитектурах или использовать его в качестве регуляризации, чтобы стимулировать изучение причинных и беспричинных моделей.

В последующем, описывается процесс создания искусственных причинно-следственных данных вместе с подготовкой процедуры к НКП, что



позволит представить результативность НКП в причинно-следственных данных из реального мира.

Построим  $n$  искусственных обозреваемых образцов,  $i$  –ый обозреваемый образец содержит  $m_i$  точек. Точки, используемые в обозреваемом образце  $Q_i = \{(x_{ij}, y_{ij})\}_{j=1}^{m_i}$  взяты из аддитивной модели шума  $y_{ij} \leftarrow f_i(x_{ij}) + v_{ij}e_{ij}$  для всех  $j = 1, \dots, m_i$ .

Условия причины  $x_{ij}$  взяты из сочетания  $k_i$  гауссовских дистрибутивов. Мы строим каждый гауссиан путем выборки среднего значения из гауссиана  $(0, r_i)$ , его стандартного отклонения и гауссиана  $(0, s_i)$  с последующим абсолютным значением, и его ненормированного сочетания веса и гауссиана  $(0, 1)$  с последующим абсолютным значением. Мы производим выборку  $k_i \sim RandomInteger[1, 5]$  и  $r_i, s_i \sim Uniform[0, 5]$ . Нормализуем сочетание весов, чтобы свести их к одному, нормализуем  $\{x_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$  в среднее нулевое значение и единичную дисперсию.

Механизм  $f_i$  является кубическим сплайном Эрмита с поддержкой и  $d_i$  узлы взяты из гауссиана  $(0, 1)$ , где  $d_i \sim RandomInteger(4, 5)$ .

$$\left[ \min \left( \{x_{ij}\}_j^{m_i} \right) - std \left( \{x_{ij}\}_j^{m_i} \right), \max \left( \{x_{ij}\}_j^{m_i} \right) + std \left( \{x_{ij}\}_j^{m_i} \right) \right] \quad (4)$$

Бесшумный эффект условия  $\{f(x_{ij})\}_j^{m_i}$  нормализован, чтобы получить среднее нулевое значение и единичную дисперсию.

Шумовое условие  $e_{ij}$  выбирается из гауссиана  $(0, v_i)$ , где  $v_i \sim$  однородность  $[0, 5]$ . Для обобщения НППМ, мы предполагаем для гетероскедастического шума следующее: умножаем каждый  $e_{ij}$  на  $v_{ij}$ , где  $v_{ij}$  – значение сглаживающего сплайна с поддержкой, показанной в (3) и  $d_i$ , случайными узлами, взятыми из однородности  $[0, 5]$ . Шумовое условие  $\{x_{yj}\}_{j=1}^{m_i}$ , нормализовано для получения среднего нулевого значения и единичной дисперсии.

Этот процесс выборки производит учебный набор из  $2n$  образцов:

$$D = \left\{ \left( \left( \{x_{ij}, y_{ij}\}_{j=1}^{m_i}, 0 \right) \right)_{i=1}^n \cup \left\{ \left( \left( \{y_{ij}, x_{ij}\}_{j=1}^{m_i}, 0 \right) \right)_{i=1}^n \right. \quad (5)$$

Мы готовим НКП с двумя встроенными слоями и двумя слоями классификации с последующими выходными слоями. Каждый скрытый слой представляет собой набор из пакетной нормализации [2], 100 скрытых нейронов, выпрямленного линейного соединения и 25% выпадающего [4]. Подготавливаем его для 10000 итераций, используя RMSProp с параметрами по умолчанию, где каждая мини-партия имеет вид, приведенный в (4) и имеет

размер  $2n = 32$ . Соблюдаем симметрию  $P(X \rightarrow Y) = 1 - P(Y \rightarrow X)$ , благодаря образованию составного классификатора:

$$\frac{1}{2} \left( 1 - NCC \left( \{(x_{ij}, y_{ij})\}_{j=1}^{m_i} \right) + NCC \left( \{(y_{ij}, x_{ij})\}_{j=1}^{m_i} \right) \right), \quad (6)$$

где НКП  $\left( \{(x_{ij}, y_{ij})\}_{j=1}^{m_i} \right)$  стремится к 0, если классификатор полагает, что  $X_i \rightarrow Y_i$ , и стремится к единице, если классификатор полагает, что  $X_i \leftarrow Y_i$ . Выбираем параметры путём мониторинга ошибки при проверке НКП на удерживаемом наборе из 10000 искусственных обозреваемых образцов. Используя этот набор, мы перекрёстно выбираем процент отсева из  $\{0,1; 0,25; 0,3\}$ , количество скрытых слоёв из  $\{2,3\}$  и количество скрытых соединений в каждом из слоёв из  $\{50,100,500\}$ .

Проведены эксперименты с двумя наборами данных: PASCAL VOC 2012 [2] и MS COCO [4]. Эти наборы содержат разнородные изображения, собранные с изображением природы. В массивах данных в PASCAL рассмотрены двадцать классов, таких как самолет, собака, мотоцикл, человек, телевизор и др. Этот массив данных содержит 11541 изображений. В массивах данных MS COCO исследованы те же классы. Этот выбор составляет около 99,309 изображений. Предварительно обработав изображения, установили размер в 224x224 пикселей.



а) Исходное изображение  $x_j$



б) Изображение объектов  $x_j^0$



в) Изображение контекста  $x_j^c$

Рисунок 4 – Процесс затемнения объекта «собака» фото

Исходное изображение  $x_j$  создает особенности  $\{f_{jl}\}_l$  и класс-вероятность  $\{c_{jk}\}_k$ . Изображение объектов  $x_j^0$  создает особенности  $\{f_{jl}^0\}_l$ . Изображение контекста  $x_j^c$  создает особенности  $\{f_{jl}^c\}_l$ . Процессы затемнения выполняются после нормализации изображения, чтобы получить «чёрный ноль» пикселей. Используем последние скрытые представления глубоких нейронных

свёрточных сетей из 18 слоев [3], как источников признаков. Эта сеть была подготовлена на всем массиве данных ImageNet [3].

Обозначим  $f_j = f(x_j) \in R^{512}$ , как вектор вещественных функций, полученный из изображения  $x_j \in R^{3 \times 224 \times 224}$ , которое использует эту сеть.

Формируем классификатор нейронной сети из двух скрытых слоев из 512 наборов каждый. Через  $c_j = c(x_j) \in R^{20}$  обозначим вектор непрерывных коэффициентов регистрации, полученный из изображения  $x_j \in R^{3 \times 224 \times 224}$ , которое использует этот классификатор. Далее описываем вычисления для каждой особенности  $l = 1, 512$  четырьмя разными оценками: оценкой объекта, контекста, причинности и беспричинности. Оценки объекта рассчитываются независимо от оценки причинности/беспричинности.

Далее описывается процесс подсчёта оценок объекта  $k$  для всех двадцати объектов из эксперимента.

Каждое изображение  $x_j$  в массиве данных MS COCO описывается тремя разными способами для всех  $j = 1, \dots, m$ . Начальное изображение  $x_j$  описывается, как  $f_j = f(x_j)$ . Произведено затемнение контекста интересующего объекта  $k$  в  $x_j$ , размещая нулевые пиксели вне ограничивающих его прямоугольников. Благодаря этому появляется изображение объекта  $x_j^o$ , как показано на рис. 2б. Произведено затемнение объект  $k$  в  $x_j$ , поместив нулевые пиксели во внутрь ограничивающих их прямоугольников. Благодаря этому появляется изображение контекста  $x_j^c$ , как показано на рис. 4в.

Используя три предыдущие характеристики, для каждой особенности  $l = 1, \dots, 512$  рассчитываем их оценку объекта:

$$s_l^o = \frac{\sum_{j=1}^m |f_{jl}^c - f_{jl}|}{\sum_{j=1}^m |f_{jl}|}$$

и оценку контекста:

$$s_l^c = \frac{\sum_{j=1}^m |f_{jl}^o - f_{jl}|}{\sum_{j=1}^m |f_{jl}|}.$$

Особенности с высокими оценками объекта реагируют на то, когда объект удаляется с изображения. Кроме того, рассчитано коэффициенты регистрации на наличие интересующего объекта  $k$  по отношению к исходному изображению  $x_j$  как  $c_{jk} = c(x_j)_k$ .

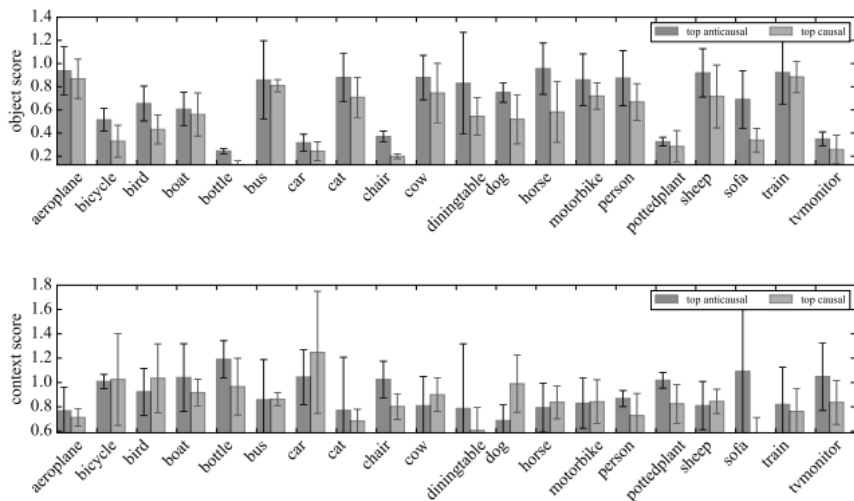


Рисунок 5 – Оценки объекта и контекста для беспричинных и причинных характеристик

Для каждой особенности  $l$  рассчитана оценка причинности: 1-НКП  $(\{(f_{jl}, c_{jk})\}_{j=1}^m)$  и беспричинности: 1-НКП  $(\{(c_{jk}, f_{jl})\}_{j=1}^m)$ . Во избежание обнаружения причинности между независимыми случайными величинами необходимо использование НКП с дополнительным обучающим набором: в дополнение к каждой представленной диаграмме рассевания во всех причинных направлениях, как на (4), подобрана случайная перестановка  $\sigma$ , для создания дополнительного некоррелированного набора  $\{x_{i,\sigma(j)}, y_{ij}\}_{j=1}^{m_i}$  с отметкой  $\frac{1}{2}$ . Модель такого рода после проверки на точность выдаёт 79% в массиве данных Тюбингена.

Таким образом, на рис. 5 показано среднее значение и среднее отклонение оценки особенностей объекта и оценки особенностей контекста с 1% беспричинных оценок и 1% причинных оценок. Как и предполагалось, характеристика объекта связана с беспричинной характеристикой. В частности, характеристики с наибольшим беспричинным значением показывают большую оценку объекта, чем характеристики с наибольшей причинной оценкой. Этот эффект подтверждается на всех 20 интересующих классах, при выборе 1% причинных/беспричинных характеристик, и остается последовательным в 16 из 20 интересующих классов при отборе 20% тех же характеристик. Результаты показывают, что необходимость использования беспричинных характеристик объектов в устойчивом порядке, вне зависимости от их контекста. Как сказано в предположении, невозможно

найти последовательные отношения между характеристиками контекста и причинными характеристиками. Эксперименты показали наличие статистически обозримых сигналов причинно-следственных связей в наборе статических изображений.

**Список использованной литературы:** 1. *P. Daniusis, D. Janzing, etc.* Inferring deterministic causal relations. In UAI, 2010. 2. *Сальников И. И.* Анализ пространственно-временных параметров удаленных объектов в информационных технических системах / Сальников И.И. – М.: Физматлит, 2011. – 252 с. 3. *Timofeev A. V., Andreev V., etc.* Design and implementation of multi-agent manmachine interface on the base of virtual reality models. – 9th International Conference SPEECOM'2004 (September 20-22, 2004, St.Petersburg), pp. 670-675. 4. *Belhumeur P. N., Hespanha J. P., Kriegman D. J.* Eigenfaces vs Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1997, Vol. 19, pp. 711-720. 5. *Косенко Ю. І., Рослякова С. В., Носов П. С.* Система ідентифікації функціональної ентропії суб'єкта критичної інфраструктури [Текст] // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции/ Современные направления теоретических и прикладных исследований. – Вип. 2. – Одесса, 2013. – С. 50 – 54.

**Bibliography (transliterated):** 1. *P. Daniusis, D. Janzing, etc.* Inferring " deterministic causal relations. In UAI, 2010. 2. *Sal'nikov I. I.* Analiz prostranstvenno-vremennyh parametrov udalennyh ob'ektov v informacionnyh tehniceskikh sistemah / Sal'nikov I.I. – М.: Fizmatlit, 2011. – 252 s. 3. *Timofeev A. V., Andreev V., etc.* Design and implementation of multi-agent manmachine interface on the base of virtual reality models. – 9th International Conference SPEECOM'2004 (September 20-22, 2004, St.Petersburg), pp. 670-675. 4. *Belhumeur P. N., Hespanha J. P., Kriegman D. J.* Eigenfaces vs Fisherfaces: Recognition Using Class Specific Linear Projection. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1997, Vol. 19, pp. 711-720. 5. *Kosenko Ju. I., Rosljakova S. V., Nosov P. S.* Sistema identifikacii funkcional'noi entropii sub'ekta kritichnoi infrastrukturi [Tekst] // Sbornik nauchnyh trudov po materialam mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii/ Sovremennye napravlenija teoreticheskikh i prikladnyh issledovanij. – Vip. 2. – Odessa, 2013. – S. 50 – 54.

УДК 69.058.7

М.А. Голофеева, канд. техн. наук, А.С. Левинский,  
В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, Одесса, Украина

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРОВ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ**

*В статті розглядаються питання підвищення точності вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки. Показано, що врахування відхилення дійсного значення коефіцієнта випромінювальної спроможності об'єкта контролю від номінального дає можливість суттєво підвищити точність вимірювання температури безконтактним методом.*

**Ключові слова:** *точність вимірювання температури, прилади інфрачервоної техніки*

*В статье рассматриваются вопросы повышения точности измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники. Показано, что учет отклонения действительного значения коэффициента излучательной способности поверхности объекта контроля от номинального дают возможность повысить точность измерения температуры бесконтактным методом.*

**Ключевые слова:** *точность измерения температуры, приборы инфракрасной техники*

*The article deals with improving the accuracy of the measuring the temperature using infrared imaging devices. It is shown that taking into account the deviation of the actual values of emissivity of the surface of the object from the nominal control make it possible to improve the accuracy of contactless method of the measuring the temperature.*

**Keywords:** *the accuracy of the measuring the temperature, infrared imaging devices*

В последнее время интерес к применению приборов инфракрасной техники в различных отраслях существенно возрос. Это, в первую очередь, связано с тем, что температура, как количественный показатель внутренней энергии тел, является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, превращение, передача, накопление и применение энергии в различных ее формах. В это же время, проблема энергосбережения в Украине на сегодняшний день является особенно актуальной [1].

Учитывая, что промышленная деятельность сопровождается безвозвратными потерями тепловой энергии, анализ тепловых процессов (потерь тепла, температурных полей и п.т.) позволяет получить разнообразную информацию относительно состояния объектов и протекания физических процессов в природе, энергетике, промышленности и строительстве [2].

Проблеме применения бесконтактного метода измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники посвящено большое количество работ, как отечественных авторов, так и зарубежных. Среди них можно

отметить О. Н. Будагина, А. И. Потапова, В. И. Калганова, В. В. Клюева, В. Н. Фелино, В. П. Вавилова, А. Г. Климова, Т. Е. Троицкого-Маркова, М. И. Щербакова, С. А. Бажанова, А. В. Крюкова, Petersson, J. Hart, S. Kimothi, E. Grinzato и др. Все они отмечают преимущества тепловизионного метода, среди которых можно отметить информативность, дистанционность, высокая скорость проведения работ, мобильность аппаратуры, безопасность, отсутствие необходимости выведения объекта контроля из эксплуатации [3-5]. Однако, несмотря на перспективность, применение такого метода ограничивается определенными трудностями, которые зачастую приводят к существенному снижению точности измерения.

Известно, что мощность излучения, достигающего чувствительного элемента приборов инфракрасной техники, является функцией температуры исследуемого участка поверхности и заранее неизвестного коэффициента излучения, который, в свою очередь, зависит от материала, состояния поверхности объекта контроля и направления, в котором наблюдается излучающая поверхность. Именно неопределенность в задании излучательной способности поверхности исследуемого объекта является основной трудностью при расчетах температур по результатам тепловизионных измерений [1]. Эта физическая величина характеризуется коэффициентом излучательной способности, значение которого для поверхности каждого конкретного объекта является индивидуальным.

В том случае, когда коэффициент излучения объекта контроля является известным, его фактическая температура может быть рассчитана по формуле [6]:

$$T_{\text{факт}} = \frac{T_{\text{рад}}}{\sqrt[4]{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{факт}}$  – фактическая температура объекта контроля;  $T_{\text{рад}}$  – радиационная температура объекта контроля, воспринимаемая прибором инфракрасной техники;  $\varepsilon$  – коэффициент излучательной способности материала объекта контроля.

Были проведены исследование влияние ошибки в задании коэффициента излучательной способности на точность бесконтактного метода измерения температуры. Проводились одновременные измерения температуры поверхности объектов контроля, изготовленных из различных материалов, бесконтактным методом с помощью тепловизора Fluke Ti9 и контактным методом с помощью термопары ТХА. Показания, полученные с помощью термопары, принимались в качестве действительных значений температуры.

При расчетах фактической температуры поверхности объекта контроля в качестве значение коэффициента излучательной способности в первой серии экспериментов применяли справочные данные, а во второй – измеренное значение коэффициента излучательной способности.

Определение коэффициента излучательной способности проводили следующие способом. На характерной зоне исследуемой поверхности без температурных аномалий выбирались реперные точки, температуры в которых должны быть измерены контактным термометром. В этих же точках измеряли температуру тепловизором при заранее установленных параметрах съемки (отраженной температуре фона, температуре и влажности атмосферы, расстоянии до объекта контроля). При наличии разницы между значениями температур, измеренных контактным и бесконтактным методами, с панели тепловизора подбирали такое значение коэффициента излучения поверхности, которое сводит эту разницу к нулю. Полученное таким образом значение коэффициента излучения принимали за характеристику поверхности в данной зоне и использовали в дальнейшей тепловизионной съемке. Результаты исследований приведены на рис. 1 и 2.

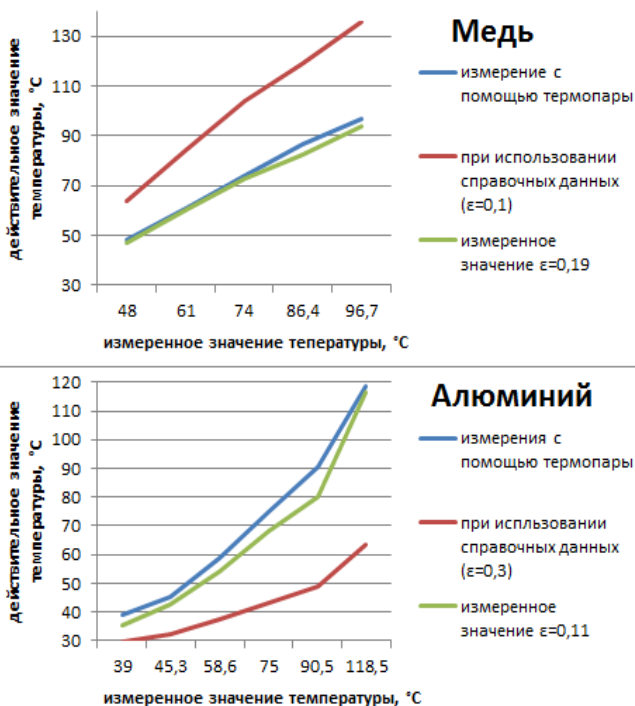


Рисунок 1 – Влияние коэффициента излучательной способности на точность бесконтактного метода измерения температуры меди и алюминия



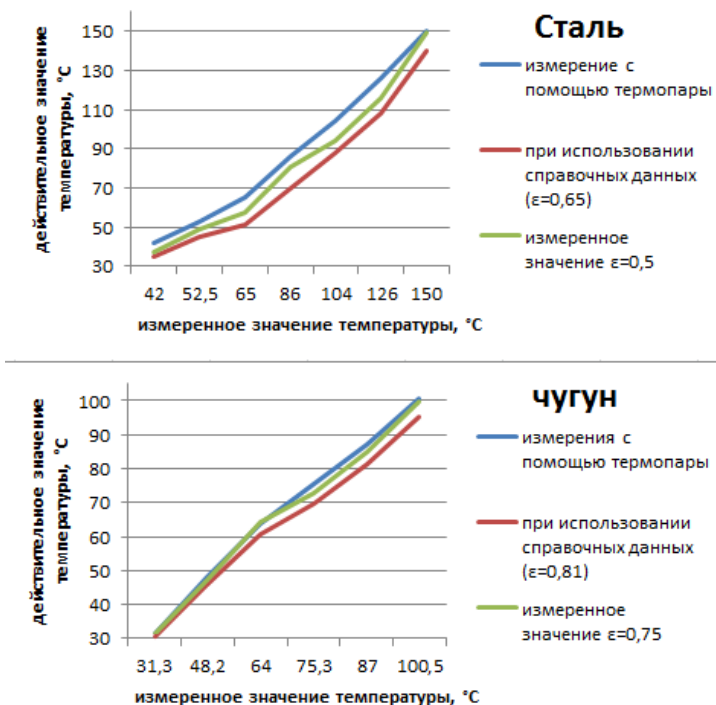


Рисунок 2 – Влияние коэффициента излучательной способности на точность бесконтактного метода измерения температуры стали и чугуна

Из рис. 1 и 2 видно, что точность измерения температуры существенным образом зависит от правильности указания коэффициента излучательной способности, который в свою очередь является функцией температуры исследуемого участка поверхности и заранее неизвестного коэффициента излучения, зависящего от материала, состояния поверхности объекта контроля и направления, в котором наблюдается излучающая поверхность.

Составляющая неопределенности измерения температуры приборами инфракрасной техники, вызванная ошибкой в задании коэффициента излучательной способности относится к неопределенности по типу В, которую можно рассчитать по формуле:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} u_B^2(x_i) \quad (2)$$

где  $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)$  – частные производные функции  $f$  по аргументам  $x_i$ .

Учитывая (1) и взяв производные, получаем:

$$u_{BT} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot u_{BT_{рад}}^2 + \frac{T_{рад}^2}{16\sqrt{\epsilon^5}} \cdot u_{B\epsilon}^2}, \quad (3)$$

где  $U_{BT_{рад}}$  – неопределенность измерения тепловизором ;  $U_{B\epsilon}$  – неопределенность установления коэффициента излучательной способности.

Расчеты показали, что неопределенность измерения температуры бесконтактным методом может превышать 30 %, что, безусловно, является недопустимым.

Показано, что, несмотря на преимущества бесконтактного метода измерения температуры, его применение связано с определенными трудностями, которые зачастую приводят к существенному снижению точности измерения. Учет отклонения действительного значения коэффициента излучательной способности поверхности объекта контроля от номинального дают возможность повысить точность измерений температуры с помощью приборов инфракрасной техники.

**Список использованных источников:** 1. *Оборський Г.О., Левинський О.С., Голофеева М.О.* Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю // Технологический аудит и резервы производства - №2/3(28), 2016. – С. 4-7. 2. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль – М.: ИД Спектр, 2009 – 544 с. 3. *D.S. Prakash Rao* Infrared thermography and its applications in civil engineering. The Indian Concrete Journal. – May 2008 – P. 41-50/ 4. *K. Valancius* Transicnt heat conduction process in multilayer wall under the influence of solar radiation // Improving human potential program / Proceedings, 2002, Almeria, Spain: PSA. – P. 179-185. 5. *Госсорг, Ж.* Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение – М. : Мир, 1988 – 416 с. 6. *Енюшин В.Н., Крайнов Д.В.* О влиянии излучательной способности поверхности исследуемого объекта на точность измерения температур при тепловизионном обследовании // Известия КТАСУ – №1 (23), 2013. – С. 99-103.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Obors'kij G.O., Levins'kij O.S., Golofeeva M.O.* Doslidzhennja vplivu viprominjival'no'i zdatnosti materialiv na tochnist' teplovizijnogo metodu kontrolju // Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva - №2/3(28), 2016. – S. 4-7. 2. *Vavilov V.P.* Infrakrasnaja termografija i teplovoj kontrol' – М.: ID Spektr, 2009 – 544 s. 3. *D.S. Prakash Rao* Infrared thermography and its applications in civil engineering. The Indian Concrete Journal. – May 2008 – P. 41-50/ 4. *K. Valancius* Transicnt heat conduction process in multilayer wall under the influence of solar radiation // Improving human potential program / Proceedings, 2002, Almeria, Spain: PSA. – R. 179-185. 5. *Gossorg, Zh.* Infrakrasnaja termografija. Osnovy. Tehnika. Primenenie – М. : Mir, 1988 – 416 s. 6. *Enjushin V.N., Krajnov D.V.* O vlijanii izluchatel'noj sposobnosti poverhnosti issleduemogo ob'ekta na tochnost' izmerenija temperatur pri teplovizionnom obsledovanii // Izvestija KTASU – №1 (23), 2013. – S. 99-103.

УДК 692. 981

В.С. Гусарев, канд. техн. наук, Одесса, Україна

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ В ГПС

*Гнучкими виробничими системами «ГПС» називаються автоматичні комплекси, які складаються з верстатів з ЧПУ, промислових роботів і магазинів-накопичувачів для зберігання заготовок і оброблених частково або повністю виробів.*

**Ключові слова:** *гнучкі виробничі системи, автоматичні комплекси, станки з ЧПУ, промислові роботи, магазини-накопичувачі*

*Гибкими производственными системами «ГПС» называются автоматические комплексы, которые состоят из станков с ЧПУ, промышленных роботов и магазинов-накопителей для хранения заготовок и обработанных частично или полностью изделий.*

**Ключевые слова:** *гибкие производственные системы, автоматические комплексы, станки с ЧПУ, промышленные роботы, магазины-накопители*

*Flexible production systems (FPS) refers to the automatic complexes which consist of CNC machine tools, industrial robots and shops-drives for storing work pieces and partially or completely processed products.*

**Keywords:** *flexible production systems, automatic complexes, CNC machine tools, industrial robots, shops-drives for storing*

Гибкими производственными системами «ГПС» называются автоматические комплексы, которые состоят из станков с ЧПУ, промышленных роботов и магазинов-накопителей для хранения заготовок и обработанных частично или полностью изделий. ГПС допускают возможность бесперепадного выпуска большой номенклатуры деталей. Это широкое разнообразие деталей может поступать на обработку в систему в произвольном порядке.

Обеспечение перечисленных свойств и возможностей ГПС создает групповая технология, которая предусматривает максимальную загрузку станков за счет высокой концентрации операций на автоматизированных станках при одновременном сокращении их количества. Суть групповой обработки (по проф. С.П.Митрофанову) заключается в следующем: «различные детали комплектуются в группу по совпадающим элементам-поверхностям, обработка которых требует одинаковых технологических операций, необходимых для их изготовления. В группе выделяется характерная для неё деталь, называемая комплексной, которая является наиболее сложной при изготовлении в данной группе. В случае, когда такая деталь отсутствует в группе, искусственно создают комплексную деталь, содержащую все основные элементы данной группы деталей».

И так, необходимо иметь (или создать) «комплексную деталь». Например, из некоторого набора (множества) элементов-поверхностей:

$\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}$ . Комплексная деталь  $\{abcd\}$  должна иметь тот же набор элементов, что и другие детали, составленные из разных сочетаний исходных элементов-поверхностей:

$\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}$   
 $\{ab\}, \{bc\}, \{ac\}, \{ad\}, \{bd\}, \{cd\}$   
 $\{abc\}, \{abd\}, \{acd\}, \{bcd\}$   
 $\{abcd\}$ .

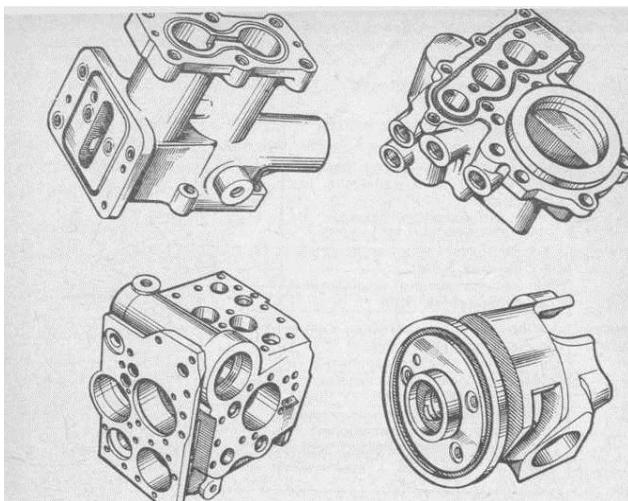


Рисунок 1 – Корпусные детали для обработки в ГПС

Такой набор технологических объектов (ТО) представляет собой серию. Естественно ГПС применяют в серийном и мелкосерийном производстве. Серия включает несколько групп деталей, составленных из разных сочетаний поверхностей-элементов, включая и комплексную деталь. Такой набор ТО и есть серия, т.е. номенклатура деталей обрабатываемых в ГПС.

В примере серию ТО представляет набор, состоящий из четырех групп деталей, включая и комплексную деталь (КТО). Иначе, серия – это множество технологических объектов (ТО), а группа – это подмножество этого множества, сформированного на совокупности элементов-поверхностей. Количество деталей, объединенных в серию, определяется как «мощность множества», по формуле:

$$N(j) = 2^j - 1,$$

для нашего случая,  $j = 4$  и тогда  $N(4) = 15$ . При этом общее число элементов – поверхностей  $N_{\Sigma} = 32$ .

Все эти детали образуют серию и поэтому могут быть обработаны в ГПС с наладкой на «комплексную деталь»  $\{abcd\}$ . В практике серию может образовывать меньшее число деталей из числа возможных.

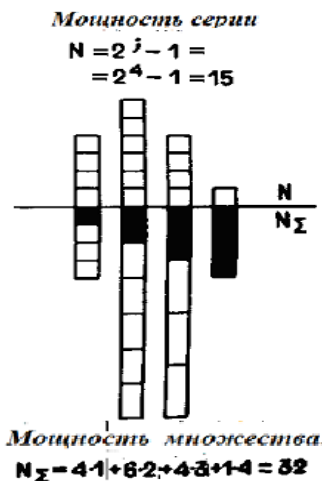
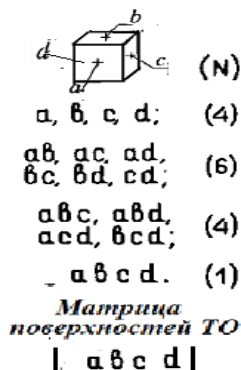
Обработка детали в технологической системе (по А.П. Соколовскому) проходит в несколько этапов. Каждый этап обработки формирует элементы-поверхности с новыми характеристиками. Получаются технологические объекты (ТО), состоящие из расширенного набора (мультимножества) элементов-поверхностей. Они образуются в процессе поэтапной обработки детали, которые приобретают новые свойства (качества):

$$[N(i,j)]$$

где  $i = 1,2,3,\dots$ ,

$n$  – этапы обработки

$j = a,b,c,\dots,k$  – элементы ТО.



Рассмотрим образование мультимножества «элементы-поверхности» на примере  $[N(i, j)] = [N(3, 3)]$  для ТО, в котором  $i = 1,2,3$  и  $j = a,b,c$ .

Исходная заготовка -  $a_0 \ b_0 \ c_0$ . Деталь после обработки 1 этапа -  $a_1 \ b_1 \ c_1$ , после 2 этапа -  $a_2 \ b_2 \ c_2$ , после 3 этапа -  $a_3 \ b_3 \ c_3$  будет изображаться матрицей:

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}$$

Здесь  $N(i;j)$  определяет число деталей в серии или «мощность мультимножества», определяемое по формуле:

$$N(i;j) = (i+1)^j - 1.$$

Наше предложение состоит из включения в серию всех групп деталей с элементами поверхностей, образуемыми по ходу выполнения этапов обработки. Такая «модель» может описывать «комплексную деталь», как сложный ТО, который включает в себя все возможные технологические группы ТО. Мультимножество, построенное по выше приведенной схеме, имеет «мощность» в нашем примере

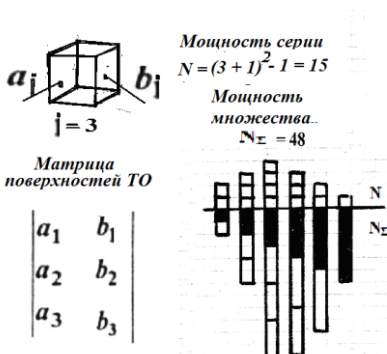
$$N(3;3) = (3+1)^3 - 1 = 63.$$

Кроме общего количества деталей в серии, нас может интересовать количество групп и количество деталей в каждой группе. Для расчета плановых заданий и программирования обработки элементарных поверхностей целесообразно иметь представление о полном числе элементов-поверхностей в каждом конкретном случае. Такой расчет можно вести по диаграмме (см. выше). Для варианта [  $N(3;3)$  ] имеем:

$$N(i;j) = 3 \cdot 1 + 6 \cdot 2 + 10 \cdot 3 + 12 \cdot 4 + 12 \cdot 5 + 10 \cdot 6 + 6 \cdot 7 + 3 \cdot 8 + 1 \cdot 9 = 288.$$

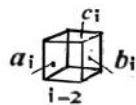
Количественная характеристика серии, группы деталей существенно зависит от исходного базового множества элементов-поверхностей и числа этапов, которые формируют мультимножество, иначе матрицы поверхностей обрабатываемого технологического объекта. Рассмотрим несколько вариантов матриц поверхностей и характерные для них «мощности множества».

Серия (множество) из двух базовых элементов и трех этапов:



Вид матрицы поверхностей существенно изменяет представление о возможностях комплектации деталей в серию или группу.

Серия (множество), сформированная из трех элементов и двух этапов:

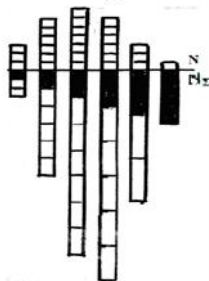


Мощность серии  
 $N = (2 + 1)^3 - 1 = 26$

Мощность множества  
 $N_{\Sigma} = 81$

Матрица поверхностей ТО

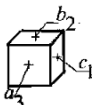
$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{vmatrix}$$



Если набор свойств ТО определяется неполной матрицей, для определения числа ТО в серии надо пользоваться формулой:

$$N(i,j,o) = (i_a+1) (i_b+1) (i_c+1) - 1,$$

Серия, сформированная из базовых элементов, которые обрабатываются в разное число этапов, т.е. имеет неполную матрицу элементов-поверхностей.



Матрица поверхностей ТО

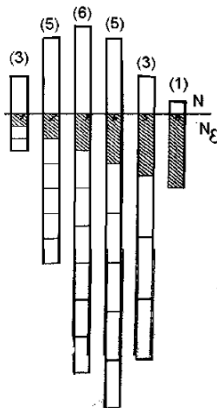
$$|N(i,j,o)| = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & 0 \\ a_3 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Мощность серии

$$N(i,j,o) = (i_a+1) (i_b+1) (i_c+1) - 1 = (3+1) (2+1) (1+1) - 1 = 23$$

Мощность множества

$$N_{\Sigma} = 1 \cdot 3 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 6 + 4 \cdot 5 + 5 \cdot 3 + 6 \cdot 1 = 72$$



В этой серии: три ТО с одним элементом, пять ТО – с двумя, шесть ТО – с тремя, пять ТО – с четырьмя, три ТО – с пятью и один ТО с шестью элементами. Определение числа ТО, обрабатываемых в ТАС, позволяет на начальных стадиях проектирования находить дополнительные возможности по их обработке. Они часто скрыты при обычном традиционном анализе и поэтому не включены в исходное техническое задание. Если ГПС, находясь в эксплуатации, производит ограниченное число ТО из серии, то существует реальная возможность в этой же системе обрабатывать и другие ТО из этой серии, ранее не предусмотренные проектом.

Например, если их число будет  $n$ , из возможных  $N$  конструктивных элементов детали, т.е.  $N > n$ , тогда можно определить коэффициент «гибкости первого рода»  $k(N) = n/N$ , его пределы  $1/N < k(N) < 1$ .

Использование общих принципов групповой обработки в ГПС приводит к появлению структурного программирования и планирования запуска деталей на обработку. Рассмотрим случай обработки серии ТО с различной сложностью в операционных действиях. Детали серии имеют разное время обработки, т. е. обладают разной «станкоемкостью» в силу их сложности. Возникает вопрос: – в каком порядке производить запуск деталей на обработку? Этот вопрос не из теории массового обслуживания, потому что нет случайного потока деталей на обслуживание (обработку) детали станком. Он здесь планируется, время обслуживания здесь величина не случайная, а известная и детерминированная. К тому же вопрос о порядке запуска к чему, ведь ГПС так или иначе будет загружена  $\Sigma T = 180$  единиц времени.

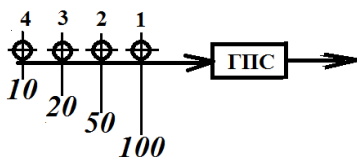


Рисунок 2 – Схема очереди ТО на обслуживание в ГПС

Однако, если учесть время, которое детали находятся в очереди на обработку (обслуживание) ГПС, то картина меняется.

$$T(i) = (t_m + t_o),$$

где  $t_m$  – время обработки,  $t_o$  – время ожидания.

Первая деталь без очереди  $T(1) = (t_m + t_o)$ , при  $t_o = 0$ ,  $T(1) = (t_m) = 100$ .

Вторая –  $T(2) = (t_m + t_o) = (50 + 100) = 150$ .

Третья –  $T(3) = (t_m + t_o) = (20 + 50 + 100) = 170$ .

Четвертая –  $T(4) = (t_m + t_o) = (10 + 20 + 50 + 100) = 180$ .



Суммарное время прохождения серии деталей через систему  $\Sigma T(n) = 600$ .

Среднее время детали  $\Sigma T(i)/n = 600/4 = 150$ .

Если построить детали в очередь в обратном порядке.

Четвертая деталь идет на обработку первой  $T(4) = (t_m + t_0) = 10$ , т.к.  $t_0 = 0$ .

Третья – второй  $T(3) = (t_m + t_0) = (20 + 10) = 30$ .

Вторая – третьей  $T(2) = (t_m + t_0) = (50 + 20 + 10) = 80$ .

Первая – четвертой  $T(1) = (t_m + t_0) = (100 + 50 + 20 + 10) = 180$ .

Суммарное время прохождения серии деталей через систему  $\Sigma T(n) = 300$ .

Среднее время детали  $\Sigma T(i)/n = 300/4 = 75$ .

Из рассмотренного сделаем вывод: построение очереди при запуске серии деталей на обработку (обслуживание) в дискретном регулярном потоке; следует планировать от простого ТО к сложному.

Использование общих принципов групповой обработки в ГПС приводит к появлению определенной структурной избыточности, как в технологических средствах, так и в элементах автоматизации. ГПС, которые созданы к настоящему времени в разных странах, весьма разнообразны, как по своей масштабности, так и уровню автоматизации. При проектировании ГПС возникают определенные трудности в представлении взаимодействия станков, роботов, транспортной и складской систем. Разрешение этих сложностей позволяет метод структурных схем [1, 2].

**Список использованных источников:** 1. *Гусарев В.С.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении /метод указания. Одесса. ОНПУ. 1999. – 35с. 2. *Гусарев В.С.* Структуры гибких производственных систем. / Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві // Зб. наукових праць. Одеса, ОНПУ, Наука і техніка, 2015. – . Вип. 3(8), с. 143-150.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Gusarev V.S.* Avtomatizacija proizvodstvennyh processov v mashinostroenii /metod ukazaniija. Odessa. ONPU. 1999. – 35s. 2. *Gusarev V.S.* Struktury gibkikh proizvodstvennyh sistem. / Inforacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobniactvi // Zb. naukovih prac'. Odessa, ONPU, Nauka i tehnika, 2015. – . Vip. 3(8), s. 143-150.

УДК 621.7

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, А.В. Погарский, Харьков, Украина

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЕКАНИЕМ**

*Розглянуто питання прогнозування залишкових деформацій промислових виробів, що виготовляються методом селективного лазерного спікання (SLS). Висунуто гіпотезу про можливість прогнозування залишкових деформацій виробів складної форми на основі існуючих підходів до прогнозування при литті пластмас. Розглянуто основні можливості програми Solidworks Plastics. Визначено коефіцієнт переходу до значень залишкових деформацій виробів виготовлених методом SLS.*

**Ключові слова:** прогнозування, остаточні деформації, селективне лазерне спікання, Solidworks Plastics, поліамід

*Рассмотрены вопросы прогнозирования остаточных деформаций промышленных изделий изготавливаемых методом селективного лазерного спекания (SLS). Выдвинута гипотеза о возможности прогнозирования остаточных деформаций изделий сложной формы на основе существующих подходов к прогнозированию при литье пластмасс. Рассмотрены основные возможности программы Solidworks Plastics. Определен коэффициент перехода к значениям остаточных деформаций изделий изготовленных методом SLS.*

**Ключевые слова:** прогнозирование, остаточные деформации, селективное лазерное спекание, Solidworks Plastics, полиамид

*The problems of predicting the residual strains of industrial products produced by selective laser sintering (SLS) are considered. There is hypothesis about the possibility of predicting residual deformations of complex shapes on the basis of existing approaches to forecasting in injection molding. The main features of the program Solidworks Plastics are presents. Defined conversion factor to the values of residual deformations of the products made by SLS.*

**Keywords:** predicting, residual strains, selective laser sintering, Solidworks Plastics, polyamide

Изготовление промышленных изделий селективным лазерным спеканием (SLS) сопровождается возникновением остаточных деформаций [1]. Остаточные деформации являются одной из основных причин, приводящих к отклонениям от правильной геометрической формы изготавливаемых изделий.

Одним из эффективных способов снижения отклонений от правильной геометрической формы является выполнение технологических компенсирующих деформаций исходных триангуляционных моделей [2]. Технологические компенсирующие деформации должны соответствовать закону изменения прогнозируемой (ожидаемой) остаточной деформации изделия и быть обратными по знаку. Для выполнения компенсирующих деформаций исходных триангуляционных моделей должны быть определены значения ожидаемых остаточных деформаций базовых поверхностей. Основными параметрами компенсирующей деформации являются стрела

прогиба  $\delta_U$  и относительное смещение центра кривизны деформации  $k_c$ .

Методы прогнозирования остаточных деформаций изделий, изготавливаемых селективным лазерным спеканием, при проведении поиска в литературных источниках не выявлены. Поэтому проведение прогнозирования на основе существующих методов применяемых к технологиям, имеющим общие признаки с селективным лазерным спеканием, является актуальной задачей.

Существенное подобие технологии литья пластмасс и SLS позволило выдвинуть гипотезу о возможности прогнозирования остаточных деформаций промышленных изделий изготовленных методом SLS на основе существующих методов используемых для литья пластмасс. В результате сравнительного анализа определены следующие виды подобий: технологическое, физическое, геометрическое и структурное [3, 4].

Прогнозирование остаточных деформаций проводились в программном пакете Solidworks Plastics. Пример экранной формы системы с исследуемой моделью изделия представлен на рис. 1.

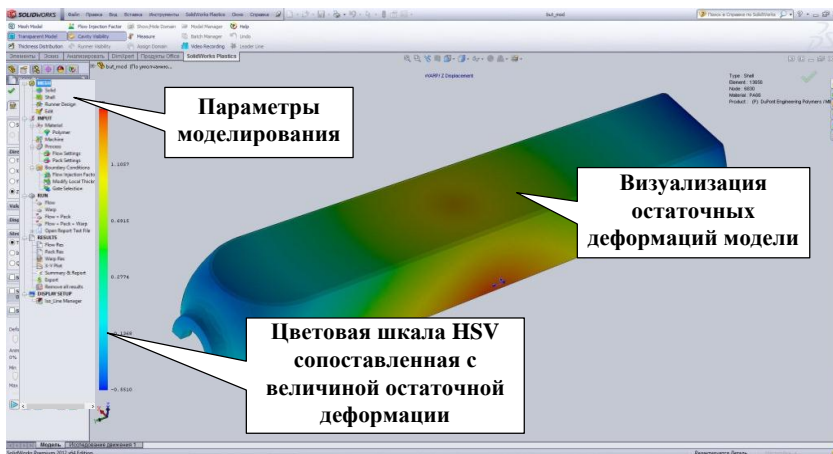


Рисунок 1 – Пример экранной формы Solidworks Plastics

Первоначально, в соответствии со схемой (рис. 2) выполнялась проверка триангуляционной модели на замкнутость поверхности. Далее производилось построение конечно-элементной модели. Геометрические характеристики конечно-элементной модели целесообразно задавать с учетом исходной триангуляционной модели.



Рисунок 2 – Схема прогнозирования остаточных деформаций в Solidworks Plastics

В Solidworks Plastics имеется достаточно обширная база марок полимерных материалов. В качестве используемого материала при моделировании выбран полиамид 66 марки Dupont Engineering Polymer / ZYTEL ST 801 L NC010, имеющий общие характеристики с используемым на SLS-установке с порошковым материалом марки Duraform PA [5].

Температура пластмассы в процессе литья задавалась в соответствии с температурой плавления выбранного материала — 230°C. Время охлаждения изделия зависело от объема модели и определялось автоматически. Необходимое медленное остывание, как при селективном лазерном спекании, обеспечивалось за счет отсутствия системы охлаждения. Литники в количестве 10-и располагались равноудалено друг от друга. Они являются необходимыми для выполнения расчетов (в соответствии со схемой на рис. 2) и достаточными по количеству для обеспечения аналогии с селективным лазерным спеканием по скорости и равномерности охлаждения.

По окончанию расчета усадки и остаточных деформаций изделия, выполнялась цветовая визуализация прогнозируемых остаточных деформаций с использованием цветовой шкалы HSV (рис. 3).

Для доказательства выдвинутой гипотезы проведено прогнозирование остаточных деформаций 12-и моделей, по которым были построены изделия на установке SLS. Между значениями стрел прогиба базовых поверхностей, полученными при прогнозировании в Solidworks Plastics –  $\Delta_{Fp}$  и при измерении изделий –  $\Delta_{Fc}$  выявлена значимая корреляция. Анализ показал прямую пропорциональную зависимость значений  $\Delta_{Fc}$  от  $\Delta_{Fp}$  (рис. 4):

$$\Delta_{Fc} = k_p \Delta_{Fp}, \quad (1)$$

Коэффициент  $k_p$  определялся методом наименьших квадратов:

$$k_p = \sum \Delta_{Fc} / \sum \Delta_{Fp}. \quad (2)$$

Использование коэффициента  $k_p$  позволяет осуществлять переход от прогнозируемых значений в Solidworks Plastics к стреле прогиба изделий изготавливаемых методом SLS. На основе экспериментальных исследований определено значение коэффициента  $k_p = 1.28 \pm 0.08$  при уровне значимости 0.05.

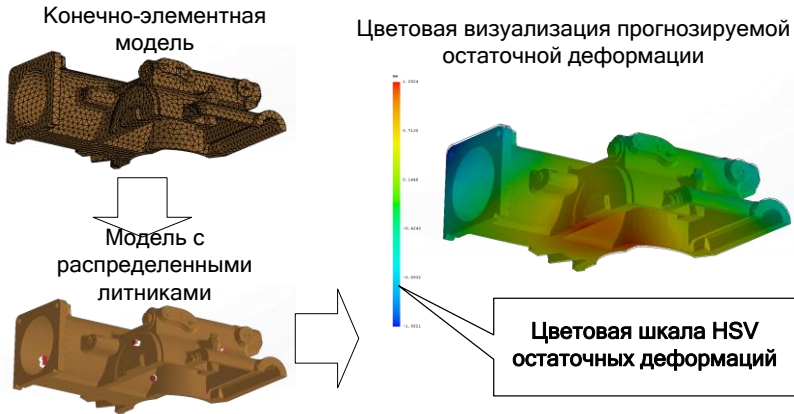


Рисунок 3 – Визуализация основных этапов прогнозирования остаточных деформаций

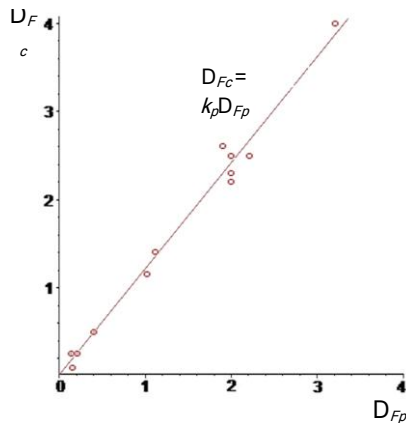


Рисунок 4 – Зависимость экспериментальных значений стрел прогиба базовых поверхностей  $\Delta_{Fc}$  от прогнозируемых  $\Delta_{Fp}$  в Solidworks Plastics

Использование Solidworks Plastics позволяет определить тип, стрелу прогиба и относительное смещение центра кривизны необходимые для применения технологических компенсирующих деформаций.

В результате проведенных исследований можно считать доказанной гипотезу о возможности прогнозирования остаточных деформаций изделий, изготовленных методом селективного лазерного спекания на основе существующих подходов используемых для литья пластмасс. Прогнозирование остаточных деформаций изделий изготавливаемых селективным лазерным спеканием позволяет определять параметры технологических компенсирующих деформаций базовых поверхностей изделий.

**Список использованных источников:** 1. Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern / Verl, A. [etc.]. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 267 p. 2. *Доброскок В.Л.* Компенсирующие деформации триангуляционных моделей промышленных изделий на этапе технологической подготовки / *В.Л. Доброскок, Ю.Б. Витязев, А.В. Погарский* // Журнал инженерных наук. – 2014. – № 1, № 2. – С. А1-А7. 3. *Грabcенко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А.* 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учебн. пособие / *А.И. Грabcенко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364 с. 4. *Лашутина Н.Г.* Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики / *Н.Г. Лашутина, О.В. Макашова, Р.М. Медведев.* – Л: Машиностроение, 1988. – 336с. 5. Characteristics of the powder material – Duraform PA. – Rock Hill, SC: 3D Systems, 2010. – 2 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion durch Selektives Lasersintern / Verl, A. [etc.]. – Berlin: Springer-Verlag, 2013. – 267 p. 2. *Dobroskok V.L.* Kompensirujushhie deformacii trianguljacionnyh modelej promyshlennyh izdelij na jetape tehnologicheskaj podgotovki / *V.L. Dobroskok, Ju.B. Vitjazev, A.V. Pogarskij* // Zhurnal inzhenernyh nauk. – 2014. – № 1, № 2. – S. A1-A7. 3. *Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Fedorovich V.A.* 3D modelirovaniealmazno-abrazivnyh instrumentov i processov shlifovanija: Uchebn. posobie / *A.I. Grabchenko, V.L. Dobroskok, V.A. Fedorovich.* – Har'kov: NTU «HPI», 2006. – 364 s. 4. *Lashutina N.G.* Tehnicheskaja termodynamika s osnovami teploperedachi i gidravliki / *N.G. Lashutina, O.V. Makashova, R.M. Medvedev.* – L: Mashinostroenie, 1988. – 336s. 5. Characteristics of the powder material – Duraform PA. – Rock Hill, SC: 3D Systems, 2010. – 2 p.

УДК 621.923.42

В.І. Кальченко, д-р техн. наук, В.В. Кальченко, д-р техн. наук,  
О.С. Сліднікова, Чернігів, Україна

### **3D-МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ПРОЦЕСУ ЗНЯТТЯ ПРИПУСКУ ТА ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ТОРЦЕВОМУ ШЛІФУВАННІ НЕКРУГЛИХ ДЕТАЛЕЙ ОРІЄНТОВАНИМИ КРУГАМИ**

*Запропоновано трьохмірне геометричне моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при двосторонньому торцевому шліфуванні циліндричних деталей з некруглим профілем. Шліфування деталей виконувється орієнтованими профільованими шліфувальними кругами, які правляться перед обробкою. Комбінована правка включає правку ділянки для зняття чорнового припуску та калібруючої ділянки. У розроблених способах обробки торців циліндричних деталей з некруглим профілем досліджено вплив орієнтації деталей в барабані на їх точність.*

**Ключові слова:** 3D-моделювання інструментів, формоутворення, шліфування циліндричних деталей

*Предложено трехмерное геометрическое моделирование инструментов процесса, снятия припуска и формообразования при двустороннем торцевом шлифовании цилиндрических деталей с некруглым профилем. Шлифование деталей выполняется ориентированными профилированными шлифовальными кругами, которые правятся перед обработкой. Комбинированная правка включает правку участка для снятия черного припуска и калибрующего участка. В разработанных способах обработки торцов цилиндрических деталей с некруглым профилем исследовано влияние ориентации деталей в барабане на их точность.*

**Ключевые слова:** 3D-моделирование инструментов, формообразование, шлифование цилиндрических деталей

*A three-dimensional geometric modeling of process tools, stock removal and shaping at the bilateral face grinding of cylindrical parts with a non-circular profile. Grinding parts performed oriented profiled grinding wheels, who ruled before processing. Combination editing includes editing area to remove rough allowance and the sizing section. The developed methods of processing the ends of cylindrical parts with a non-circular profile, investigated the influence of the orientation of parts in the drum on their accuracy.*

**Keywords:** 3D-modeling of tools, shaping, grinding of cylindrical parts

Наявна тенденція розвитку тривимірного геометричного моделювання в країнах, де розвинене машинобудування. Проте існуючі 3D-моделі недостатньо враховують особливості інструментів, зняття припуску в процесі шліфування. В умовах, коли вітчизняне машинобудування прагне стати конкурентоспроможним та високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

На машинобудівних підприємствах України параметри точності і якості обробки відповідальних деталей машин традиційно формуються при шліфуванні. В повній мірі це відноситься до обробки відповідальних деталей з торцевими робочими поверхнями, для яких встановлюються високі вимоги

по точності і якості обробки: кінцевих мір, багатограних непереточуваних твердосплавних пластин, прямокутних кришок, фланців та інших.

Найбільш продуктивним способом шліфування торців циліндричних деталей різних профілів є шліфування на двосторонніх торцешліфувальних верстатах. Так, наприклад, абразивне шліфування торцевих поверхонь на двосторонньому торцешліфувальному верстаті моделі 3342 АДО є більш високоефективним в порівнянні з обробкою на плоскошліфувальних та односторонніх торцешліфувальних верстатах.

Розробка нових взаємопов'язаних 3D-моделей інструментів та формоутворення, які описують процес двостороннього торцевого шліфування циліндричних деталей з некруглим профілем орієнтованими профільованим шліфувальними кругами, їх дослідження сприятимуть створенню нових високоефективних способів та технологій шліфування і їх впровадженню в промисловість.

В роботах [1, 2] наведено модульну трьохмірну модель оброблюваної поверхні при двосторонньому торцевому шліфуванні циліндричних деталей, яка використовується при розрахунках точності формоутворення та процесу зняття припуску.

Відома фірма Saturn (Німеччина) [3] обробляє різноманітні деталі на двосторонніх торцешліфувальних верстатах, але шліфування відбувається з невеликим нахилом шліфувальних кругів тільки в одній площині. При цьому максимальний діаметр виконує чорнову обробку на вході деталі в зону обробки та чистове шліфування на виході, що знижує точність обробки за рахунок зносу шліфувального круга.

В роботі [4] розглядається двостороннє шліфування торців циліндричних деталей з круглим профілем. Орієнтація шліфувального круга здійснюється в двох площинах. Шліфувальний круг складається з ділянки для зняття чорнового припуску та калібруючої ділянки з застосуванням комбінованої правки. Але в даній роботі розглядається обробка тільки циліндричних деталей з круглим профілем, що не потребує їх орієнтації в барабані.

В роботі [5] розглядається двостороннє шліфування торців циліндричних некруглих деталей. Орієнтація шліфувального круга здійснюється в двох площинах. Деталь розташовується згідно умови мінімізації дуги контакту на найбільшому радіусі шліфувального круга. Але в роботі відсутні профілювання шліфувального круга та дослідження впливу орієнтації деталей в барабані на їх точність.

Метою даної роботи є створення трьохмірної геометричної моделі, яка описує інструмент, процеси зняття припуску та формоутворення поверхонь циліндричних деталей з некруглим профілем та оптимізація кута їх орієнтації в барабані подачі виробів. Це дозволить за загальним алгоритмом аналізувати процеси зняття припуску та формоутворення, розробити нові способи і на їх





деталі весь час переміщуються в зону, що звужується. Остаточна точність оброблених деталей формується калібруючими ділянками шліфувальних кругів на виході із зони обробки.

Для забезпечення найбільшої точності торця та рівномірного зносу круга орієнтація деталі обирається такою, щоб при обертанні барабана верхня сторона прямокутної пластини в точці, яка розташована на осі її симетрії і лежить в площині, яка перпендикулярна верхній стороні та проходить через вісь обертання барабана, дотикалася отвору шліфувального круга.

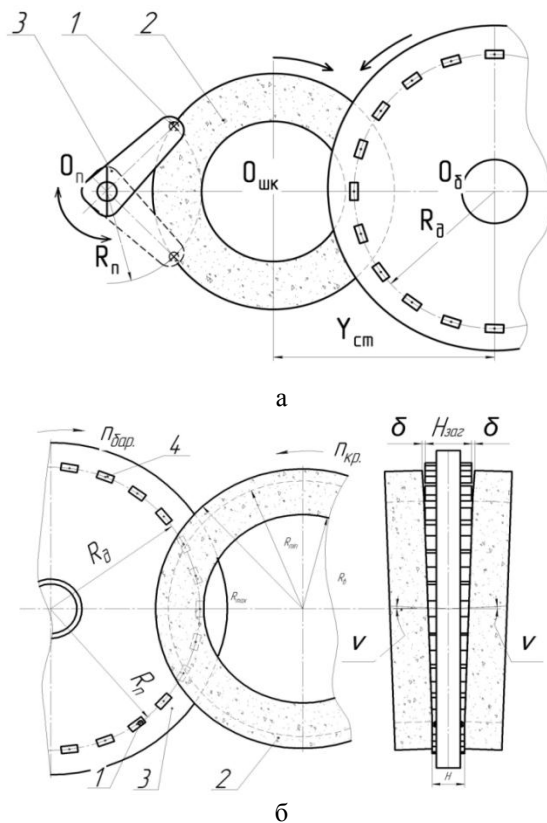


Рисунок 2 – Комбінована схема правки

Для розробки математичних моделей найбільш важливих характеристик процесу шліфування використовується функція формоутворення верстата. Вона являє собою аналітичну залежність, що зв'язує переміщення ланок

формуєтворюючої системи з траєкторією руху точок інструмента відносно оброблюваної деталі в системі координат деталі.

Калібруюча ділянка інструмента при його профілюванні на верстаті описується залежністю:

$$\begin{aligned} \vec{R}_i(\theta_B, \theta) = & M6(\theta) \cdot M1(-X_c) \cdot M5(\nu) \cdot M4(\gamma) \cdot M2(Y_c) \cdot \\ & \cdot M1(X_c) \cdot M3(Z_c) \cdot M6(-\theta_B) \cdot M1(R_B) \cdot \vec{e4}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\theta_B, \theta$  – параметри поверхні різального інструмента, що відповідають за кутове і радіальне положення точки робочої поверхні круга;  $M1, M2, M3, M4, M5, M6$  – матриці перетворення систем координат, які моделюють поступальний рух вздовж осей координат і повороти навколо них;  $X_c, Y_c, Z_c$  – розміри, які визначають положення центру сферичного пальця щодо барабана подачі і робочої площини круга;  $\gamma, \nu$  – кути орієнтації шліфувальної бабки в горизонтальній і вертикальній площинах;  $R_B$  – радіальний розмір розташування осей заготовок в барабані подачі;  $\vec{e4} = (0,0,0,1)^T$  – радіус-вектор вершини алмазного олівця для правки, що співпадає з початком координат.

Формують модель верстата описує сімейство інструментальних поверхонь в системі координат деталі:

$$\begin{aligned} \vec{R}_d(\theta_k, \theta_B, \theta) = & M1(-R_B) \cdot M6(\theta_k) \cdot M3(-Z_c) \cdot M1(-X_c) \cdot \\ & \cdot M2(-Y_c) \cdot M4(-\gamma) \cdot M5(-\nu) \cdot M6(X_c) \cdot \vec{R}_i(\theta_B, \theta), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\theta_k$  – кутова координата положення центру заготовки відносно системи координат круга.

У формуванні торця заготовки приймає участь вся поверхня калібруючої ділянки шліфувального круга, але остаточна точність може формуватися колами найменшого радіусу  $R_{min}$ , найбільшого радіусу  $R_{max}$  або лінією контакту заготовки з кругом.

Радіус-вектор характеристики на формують ділянці торцевої поверхні круга визначається із рівняння (2), враховуючи рівняння зв'язку для однопараметричного огинання, отримаємо:

$$\frac{\partial \vec{R}_d(\theta_k, \theta_B, \theta)}{\partial \theta_k} \cdot \frac{\partial \vec{R}_d(\theta_k, \theta_B, \theta)}{\partial \theta_B} \times \frac{\partial \vec{R}_d(\theta_k, \theta_B, \theta)}{\partial \theta} = 0. \quad (3)$$

Рівняння поверхні, яка утворюється при русі кола найменшого радіусу, може бути отримане із рівняння (2), якщо замість радіус-вектора поверхні підставити координати точок кола з найменшим радіусом:

$$\begin{aligned} \vec{R}_d(\theta_k, \theta) = & M6(k \cdot \theta_k) \cdot M1(-R_B) \cdot M6(\theta_k) \cdot M3(-Z_c) \cdot M1(-X_c) \cdot M2(-Y_c) \cdot \\ & \cdot M4(-\gamma) \cdot M5(-\nu) \cdot M1(X_c) \cdot M6(\theta) \cdot M1(R_{min}) \cdot M3(Z_{min}) \cdot \vec{e4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Рівняння поверхні, яка утворюється при русі кола найбільшого радіусу, може бути отримане із рівняння (2), якщо замість радіус-вектора поверхні підставити координати точок кола з найбільшим радіусом:

$$\vec{R}_0(\theta_k, \theta) = M6(k \cdot \theta_k) \cdot M1(-R_B) \cdot M6(\theta_k) \cdot M3(-Z_c) \cdot M1(-X_c) \cdot M2(-Y_c) \cdot M4(-\gamma) \cdot M5(-\nu) \cdot M1(X_c) \cdot M6(\theta) \cdot M1(R_{\max}) \cdot M3(Z_{\max}) \cdot e^{-4} \quad (5)$$

На рис. 3 а, б зображено відхилення від перпендикулярності торця кінцевої міри в залежності від її орієнтації в барабані подачі виробів. З рисунка видно, що похибка менша при розташуванні проекції меншої довжини деталі паралельно радіусу барабана (рис. 3, а).

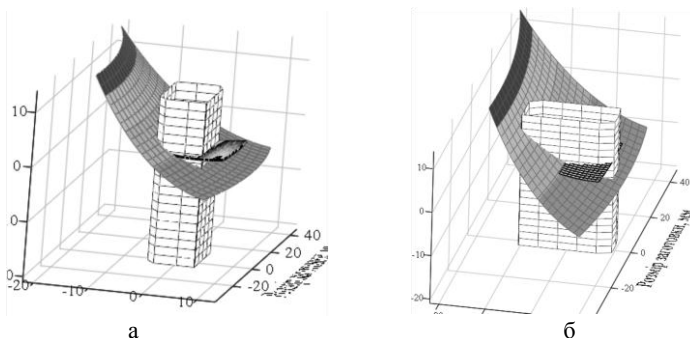


Рисунок 3 – Точність формоутворення торця деталі

На рис. 4 зображено графік залежності похибки при обробці циліндричної деталі з прямокутним профілем від кута її орієнтації в барабані подачі виробів. З графіка видно, що орієнтація деталі в барабані суттєво впливає на точність її обробки.

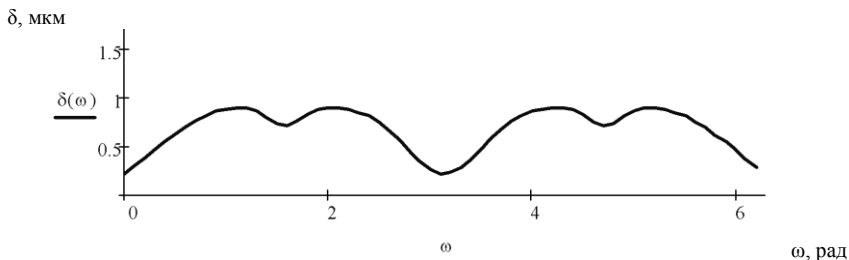


Рисунок 4 – Графік залежності похибки при обробці деталі від її кута орієнтації в барабані

На рис. 5, 6, 7 зображено відхилення від перпендикулярності торця багатограничних непереточуваних пластин: тригранних (рис. 5), чотиригранних (рис. 6), п'ятигранних (рис. 7) в залежності від їх орієнтації в барабані подачі виробів.

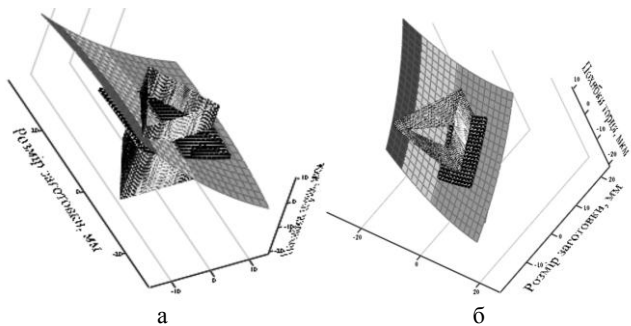


Рисунок 5 – Точність формоутворення торця тригранної непереточної пластини

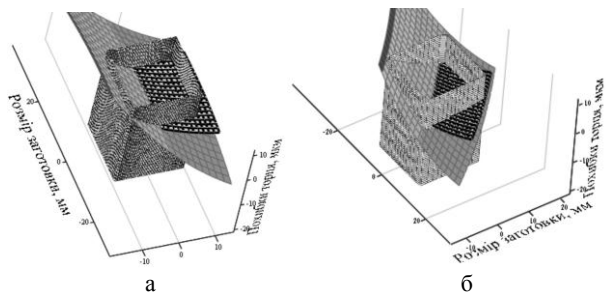


Рисунок 6 – Точність формоутворення торця чотиригранної непереточної пластини

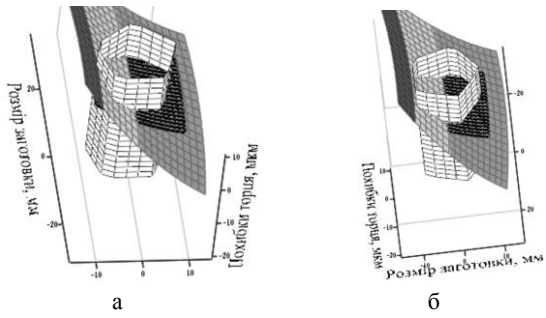


Рисунок 7 – Точність формоутворення торця п'ятигранної непереточної пластини

Як видно з рис. 3, 5-7 похибка формоутворення торця залежить від орієнтації деталей в барабані подачі виробів.

#### Висновок

Запропоновано трьохмірне геометричне моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення торцевих поверхонь деталей з некруглим профілем.

З аналізу моделей розроблені нові способи шліфування торцевих поверхонь циліндричних деталей з некруглим профілем, які орієнтуються в барабані подачі, де обробка деталей відбувається орієнтованими профільованими кругами [7-9]. Для забезпечення найбільшої точності торців деталі, її орієнтація в барабані подачі обирається такою, щоб площина, яка проходить через вісь симетрії циліндричної деталі з некруглим профілем і вісь обертання барабана подачі, була паралельна проекції мінімальної висоти деталі на цю площину.

У формоутворенні торця заготовки приймає участь вся поверхня калібруючої ділянки, але остаточна точність формується колами найбільшого, найменшого діаметрів або лінією контакту заготовки з шліфувальним кругом.

При обертанні барабана верхня сторона прямокутної пластини в точці, яка розташована на осі її симетрії і лежить в площині, яка перпендикулярна верхній стороні та проходить через вісь обертання барабана, дотикається отвору шліфувального круга.

Дана методика може бути використана також при шліфуванні деталей з некруглим профілем на заточувальних та плоскошліфувальних верстатах [6]. Орієнтація кругів в двох площинах при шліфуванні на заточувальних верстатах замінюється одним кутом орієнтації інструмента.

**Список використаних джерел:** 1. *Гرابченко А.И., Кальченко В.И., Кальченко В.В.* Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали (Монография). – Чернигов: ЧГТУ, 2009.– 356 с. 2. *Кальченко В.В.* Наукові основи ефективного шліфування зі скрещеними осями абразивного інструменту та деталі // Дисертація докт. техн. наук. Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 489 с. 3. *Satum.* Торцевое шлифование спаренными шлифовальными кругами: [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 с. 4. *Венжега В.І.* Підвищення ефективності шліфування торців при скрещених осях деталі та круга з калібрувальною ділянкою: Автореф. дис. к.т.н. - Харків, 2009. – 17 с. 5. *Ласов Г.В.* Підвищення точності шліфування торців за рахунок орієнтації профільного круга та врахування його поточного знос: Автореф. дис. к.т.н. - Харків, 2000. – 16 с. 6. *Кальченко В.І., Следнікова О.С.* і ін. 3D-моделювання інструментів та формоутворення при шліфуванні торців непереточуваних прямокутних пластин орієнтованим кругом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: зб. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – Вип. № 2 (73).– С. 55-62. 7. Пат. №99707 Україна, МПК В24В7/17 / *Следнікова О.С., Кальченко Д.В.* Спосіб двостороннього шліфування торців некруглих деталей. Опубл. 25.06.2015. Бюл. №12. 8. Пат. №99832 Україна, МПК В24В5/00 / *Кальченко В.І., Музичка Д.Г., Кальченко Д.В., Следнікова О.С.* Спосіб шліфування торців прямокутних непереточуваних пластин орієнтованим кругом. Опубл. 25.06.2015. Бюл. №12. 9. Пат. №97946 Україна, МПК В24В7/00 / *Кальченко В.І., Музичка Д.Г., Кальченко Д.В., Следнікова О.С.* Спосіб шліфування торців непереточуваних пластин з прямокутним профілем. Опубл. 10.04.2015. Бюл. №7.

- Bibliography (transliterated):** 1. *Grabchenko A.Y., Kal'chenko V.Y., Kal'chenko V.V.* Shlyfovanie so skreshchyvaiushchimisja osjami instrumenta i detali (Monografija). – Chernigov: ChNTU, 2009.– 356 s. 2. *Kal'chenko V.V.* Naukovi osnovy efektyvnoho shlifuvannja zi skreshchenymy osjamy abrazyvnoho instrumentu ta detali // Dysertatciia dokt. tehn. nauk. Harkiv: NTU «KPI». – 2006. – 489 s. 3. Saturn. Tortcevoe shlifovanie sparennymi shlifoval'nymi krugami: [Zhurnal dlja klientov firmy «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric Gmbh, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 s. 4. *Venzhega V.I.* Pidvyshchennja efektyvnosti shlifuvannja tortciv pry skreschenyh osjah detali ta kruga z kalibrvalnoju diljankoju: Avtoref. dys. k.t.n. - Harkiv, 2009. – 17 s. 5. *Pasov G.V.* Pidvyshchennia tochnosti shlifuvannja tortciv za rahunok orientacii profil'nogo kruga ta vrahuvannja yogo potochnoho znosu: Avtoref. dys. k.t.n. - Harkiv, 2000. – 16 s. 6. *Kal'chenko V.I., Slednikova O.S. i in.* 3D-modeljuvannja instrumentiv ta formoutvorennja pry shlifuvanni tortciv neperetochuvanyh prjamokutnyh plastyn oriientovanyh krugom // Visnyk Chernigiv'skogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu: zb. – Chernigiv: ChNTU, 2014. – Vyp. № 2 (73).– S. 55-62. 7. Pat. №99707 Ukraina, MPK V24V7/17 / *Slednikova O.S., Kal'chenko D.V.* Sposib dvostoronn'ogo shlifuvannja tortciv nekruglyh detalei. Opubl. 25.06.2015. Bjul. №12. 8. Pat. №99832 Ukraina, MPK V24V5/00 / *Kal'chenko V.I., Muzychka D.H., Kal'chenko D.V., Slednikova O.S.* Sposib shlifuvannja tortciv prjamokutnyh neperetochuvanyh plastyn oriientovanyh krugom. Opubl. 25.06.2015. Bjul. №12. 9. Pat. №97946 Ukraina, MPK V24V7/00 / *Kal'chenko V.I., Muzychka D.H., Kal'chenko D.V., Slednikova O.S.* Sposib shlifuvannja tortciv neperetochuvanyh plastyn z prjamokutnym profilem. Opubl. 10.04.2015. Bjul. №7.

УДК 621.9

И.П. Коновалов, Г.П. Кремнев, канд. техн. наук,  
В.Б. Наддачин, канд. техн. наук, Одесса, Украина

## **ОПЫТ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

*У роботі розглянуті питання навчання студентів при проектуванні і виготовленні заготовок деталей машин з листового прокату на сучасному автоматизованому обладнанні.*

**Ключові слова:** проектування, виготовлення заготовок деталей

*В работе рассмотрены вопросы обучения студентов при проектировании и изготовлении заготовок деталей машин из листового проката на современном автоматизированном оборудовании.*

**Ключевые слова:** проектирование, изготовление заготовок деталей

*The paper discusses the issues of the students training in the process of design and manufacture of the billets of the machine parts from the sheet metal on the modern automated equipment.*

**Keywords:** design, manufacture of the billets of the machine parts

В машиностроении применяют ряд деталей машин относительно простой формы с допусками 12...14 квалитета, которые могут быть сформированы полностью или с максимальным приближением к готовому изделию на этапе получения заготовок. К таким деталям относятся различные пластины, угольники, уклоны, шасси, крышки и другие, которые можно изготовить из горяче- или холоднокатаного листового проката при сохранении качественных показателей плоских поверхностей листа.

Традиционные методы холодной штамповки заготовок из листа хорошо отработаны технологически для прессов или молотов, и студенты при изучении курсов «Производство заготовок» или «Технология машиностроения» часто пользуются ими. Особенно эффективны эти методы в крупносерийном и массовом производстве, даже не смотря на дороговизну штампов, их ремонт и восстановление и т.д.

Ситуация существенно меняется в серийном производстве при большой номенклатуре выпускаемых деталей, периодичностью запуска партий, малой величиной этих партий и, главное, проблемой №1 становится оснастка – штампы, сроки их изготовления, стоимость, ремонт и восстановление и др. Но выход из этой ситуации есть. Современное оборудование для получения заготовок из листа может построено на использовании бесштамповых методов раскроя с инструментами на высокоэнергетических пучках: газорезущие, плазморезущие, лазерные и высокоэнергетической водной струей. Это оборудование автоматизировано, имеет системы ЧПУ, и процесс изготовления заготовок может быть совмещен (согласован) с процессом



подготовки технологии, главным документом которой при ее разработке является карта раскроя (КР).

КР можно построить вручную, но при большой номенклатуре изделий мы получим очень низкую эффективность как процесса проектирования, так и большой процент отходов при раскрое, что невыгодно из-за высокой стоимости металла.

Автоматизация процесса раскроя базируется на САПР низкой или высокой степени автоматизации.

В учебном процессе ОНПУ по специальности «Компьютерное проектирование инновационных технологий» использована вторая система – САПР «Интех-Раскрой», представляющая собой рабочее место технолога, интерактивный пользовательский интерфейс которого позволяет решать такие задачи:

- загрузка деталей в виде DXF-файлов;
- формирование задания на раскрой;
- создание раскладки исходя из задания в полуавтоматическом или автоматическом режиме;
- автоматическое построение (за кадром) траектории обработки, включая вычисление точек пробивки, эквидистант, направлений обходов;
- генерация УП для нужной СЧПУ;
- формирование отчетов по КР.

«Интех-Раскрой» имеет полуавтоматический и автоматический режимы работы при решении задач создания размещения, траектории маршрута.

Для студентов разработано и издано пособие [1] в котором имеется 4 работы по методам резки листового проката: газовая, плазменная, лазерная и водной струей и 1 комплексная работа по сравнению этих методов по их эффективности (коэффициент использования материала, производительность резки) и экономичности.

Студенту выдается учебное задание в виде комплекта чертежей (3...5 деталей различной формы и размеров от мелких до достаточно протяженных), объем выпуска каждой из этих деталей, метод резки и тип машины и по критериям оценки результатов раскроя листа (коэффициент использования материала, безвозвратных потерь, время резания, цеховой себестоимости и др.), выбирается оптимальный вариант.

Кроме этого уже в структуре САПР студенты должны выполнить лабораторные работы по исследованию процесса раскладки заготовок на лист, исследовать процесс проектирования траекторий и маршрута движения инструмента по карте раскроя (КР), исследовать процесс проектирования управляющих программ (УП) и выходных отчетов по КР.

Для упрощения практической реализации цикла из 3-х работ принято допущение, что все работы выполняются с использованием одинакового метода раскроя.

Главным преимуществом такого подхода к проектированию авторы считают то, что реальные детали, на реальных машинах проходят один из этапов: получение заготовки на базе реального ПО в структуре САПР «Интех-Раскрой», и студент может сравнить несколько вариантов и выбрать рациональный.

По такому же алгоритму [2, 3] фирма «Интех-Раскрой» готовит пользователей ее ПО для промышленных предприятий или как говорили классики: от малого до великого один шаг, но его следует сделать.

По вопросам сотрудничества просим обращаться по телефону м. (+38)063-735-1813, ПО «Интех-Раскрой» или на кафедру технологии машиностроения ОНПУ, и мы будем рады Вам помочь.

**Список использованных источников:** 1. *Кремнев Г.П., Коновалов И.П., и др.* Прогрессивные методы получения заготовок из листового проката в машиностроении (*Кремнев Г.П., Коновалов И.П., Наддачин В.Б., Коновалова Л.В., Дикаева В.Н.*) Уч. пособие. – Одесса: Печатный дом. 2016. – 48 с. 2. Руководство пользователя САПР «Интех-Раскрой». Одесса: 2016.- 87 с. 3. Интернет-джерело – <http://www.raskroy.com> САПР «Интех-Раскрой».

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kremnev G.P., Konovalov I.P., i dr.* Progressivnye metody poluchenija zagotovok iz listovogo prokata v mashinostroenii (*Kremnev G.P., Konovalov I.P., Naddachin V.B., Konovalova L.V., Dikaeva V.N.*) Uch. posobie. – Odessa: Pечатnyj dom. 2016. – 48 s. 2. Rukovodstvo pol'zovatelja SAPR «Inteh-Raskroj». Odessa: 2016.- 87 s. 3. Internet-dzherelo – <http://www.raskroy.com> SAPR «Inteh-Raskroj».

УДК 621.91

Ю.Г. Кравченко, канд. техн. наук, Дніпро,  
Н.В. Крюкова, Харків, Україна

## **ЕЛЕМЕНТНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ТОЧІННЯ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ПЛАСТИНАМИ ІЗ ПКНБ**

*Розроблена спрощена методика визначення елементних показників (напружень та коефіцієнтів тертя) на передній та задній поверхнях лева, наведено приклад їх розрахунку для процесу точіння полікристалічним кубічним нітридом бора (ПКНБ) загартованої сталі.*

**Ключові слова:** сили різання, напруження, коефіцієнт тертя, площина зсуву, режим різання, геометрія лева

*Разработана упрощенная методика определения элементных показателей (напряжений и коэффициентов трения) на передней и задней поверхностях лезвия, приведен пример их расчета для процесса точения поликристаллическим кубическим нитридом бора (ПКНБ) закаленной стали.*

**Ключевые слова:** силы резания, напряжение, коэффициент трения, плоскость сдвига, режим резания, геометрия лезвия

*A simplified method to determine the elemental parameters (stresses and friction coefficients) on the rake face and flank of the cutting wedge is developed. Their calculation for turning of hardened steel with polycrystalline cubic boron nitride (PcBN) is given as an example.*

**Keywords:** cutting forces, stress, friction coefficient, plane of shear, cutting mode, geometry of wedge

### **Вступ**

Для аналітичного розрахунку складових сили різання (дотичної  $P_z$ , радіальної  $P_y$  і осьової  $P_x$  проєкцій) і контактних температур різання, які є важливими механо-термічними показниками оптимізаційної моделі процесу різання, необхідні вихідні дані по дотичним напруженням  $\tau_s$  в умовній площині зсуву  $P_\phi$ , по напруженням  $\tau_\gamma$ ,  $\tau_\alpha$  і коефіцієнтам тертя  $\mu_\gamma$ ,  $\mu_\alpha$  на передній  $A_\gamma$  та задній  $A_\alpha$  поверхнях лева.

Одним із напрямків визначення елементних показників процесу різання пропонується метод «зворотнього» розрахунку на основі експериментальних даних динамометрування у вигляді спеціальної структури силових залежностей від режимних параметрів і геометрії лева.

Мета роботи – одержати розрахункові вирази і значення для напружень та коефіцієнтів тертя при точінні загартованих сталей надтвердими лезовими матеріалами на основі полікристалічного кубічного нітриду бора (ПКНБ).

Актуальність дослідження пов'язана з відсутністю достатньо напрацьованої інформаційної бази по елементним механічним показникам процесу різання матеріалів високої твердості.

**Постановка задачі**

Основою розрахунку прийняті два положення з механіки процесу різання.

1. Система рівнянь рівноваги представлених на рис. 1 дотичної  $P_z$  і в основній площині нормальній  $P_N$  складових сили різання  $P$  [1, 2]

$$\left. \begin{aligned} P_z &= F_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\gamma \cdot \cos \gamma + F_\alpha \\ P_N &= F_\gamma \cdot \cos \gamma - N_\gamma \cdot \sin \gamma + N_\alpha \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $F$  і  $N$  з індексами  $\gamma$  та  $\alpha$  – сили тертя і тиску на передній  $A_\gamma$  і ділянці зносу задньої  $A_\alpha$  поверхонь,  $\gamma$  – передній кут.

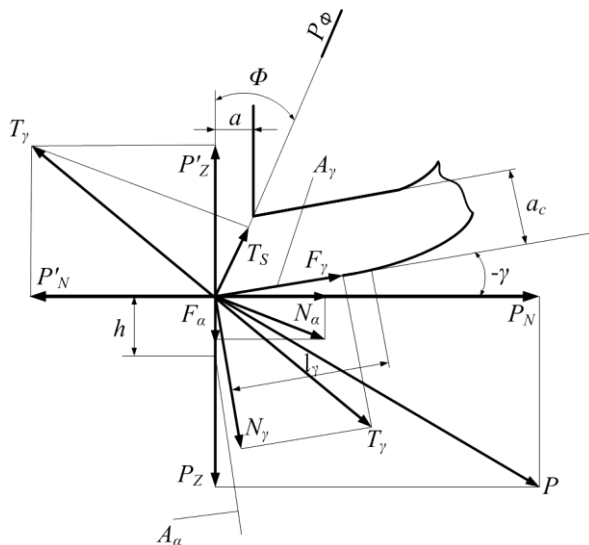


Рисунок 1 – Схема сил, які діють в площині зсуву  $P_\phi$  і на передній  $A_\gamma$  та задній  $A_\alpha$  поверхнях леза при вільному прямокутному різанні

В (1) нормальна складова сили різання дорівнює

$$P_N = (P_y^2 + P_x^2)^{0.5} \quad (2)$$

2. Рівняння зв'язку сил стружкоутворення

$$T_s = N_\gamma \cdot \cos(\phi - \gamma) - F_\gamma \cdot \sin(\phi - \gamma), \quad (3)$$

яке отримується проєцюванням  $N_\gamma$  і  $F_\gamma$  на напрямок  $T_s$  (рис. 1). Кут зсуву  $\operatorname{tg} \phi = \cos \gamma / (k_a - \sin \gamma)$  звичайно визначається через коефіцієнт потовщення стружки  $k_a = a_c / a$  ( $a = s \cdot \sin \varphi$  – товщина зрізу,  $s$  – подача,  $\varphi$  – кут в плані).

Вихідними даними служили емпіричні залежності складових  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$  від елементів режиму різання (глибини  $t$ , подачі  $s$ , швидкості  $v$ ) і геометричних параметрів леза (переднього кута  $\gamma$ , радіуса при вершині  $r$ , величини фаски зносу  $h$  по  $A_\alpha$ ) зі структурою

$$P_i = c_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^z (1 - \gamma/90)^\eta (1 + r)^V (1 + h)^u, \quad (4)$$

що дозволяє визначати  $P_z$  і  $P_N$  при нульових значеннях  $r$  і  $h$ . Цим моделюється перехід від умов невеликого різання до схеми вільного різання (незначною похибкою впливу роботи допоміжної різальної кромки при  $r = 0$  нехтуємо) з  $\varphi = 90^\circ$  при врзному точінні диска з радіальною подачею ( $P_N = P_y$ ) або торцевому точінні втулки з осьовою подачею ( $P_N = P_x$ ).

### **Основна частина**

Рішення задачі складається з трьох блоків.

1. Площина зсуву  $P_\phi$ . Після підстановки роздільного значення сил тертя і тиску на  $A_\gamma$  із спільного рішення (1)

$$\left. \begin{aligned} F_\gamma &= (P_z - F_\alpha) \sin \gamma + (P_N - N_\alpha) \cos \gamma \\ N_\gamma &= (P_z - F_\alpha) \cos \gamma + (P_N - N_\alpha) \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

в вираз (3) і пов'язаних з розкладанням функцій  $\sin(\phi - \gamma)$  і  $\cos(\phi - \gamma)$  скорочень знаходимо

$$T_s = (P_z - F_\alpha) \cos \phi - (P_N - N_\alpha) \sin \phi$$

з вихідними даними (4).

При теоретично гострому лезі ( $h = 0$ ,  $F_\alpha = N_\alpha = 0$ ) маємо:

$$T_s = P'_z \cos \phi - P'_N \sin \phi \quad \text{і} \quad \tau_s = T_s / (l_s \cdot b), \quad (6)$$

де  $l_s = a/\sin \phi$  – довжина площини  $P_\phi$ ;  $b = t/\sin \varphi$  – ширина зрізу.

2. Передня поверхня  $A_\gamma$ . При значеннях  $P_z'$  і  $P_N'$  ( $F_\alpha = N_\alpha = 0$ ) із (5) отримуємо:

$$F_\gamma = P_z' \sin \gamma + P_N' \cos \gamma \quad \text{і} \quad \tau_\gamma = F_\gamma / (l_\gamma \cdot b). \quad (7)$$

Довжина контакту стружки з  $A_\gamma$  обчислювалась по формулі [3] з поправкою [4]

$$l_\gamma = a \cdot k_a^{0,1} [k_a (1 - tg \gamma) + 2 / \cos \gamma]$$

Коефіцієнт тертя  $\mu_\gamma = F_\gamma / N_\gamma$  вираховується [5] при відомій  $T_s$  (6) із рівняння (3)

$$T_s = F_\gamma [\cos(\phi - \gamma) / \mu_\gamma - \sin(\phi - \gamma)]$$

по формулі

$$\mu_\gamma = \cos(\phi - \gamma) \cdot [T_s / F_\gamma + \sin(\phi - \gamma)]^{-1}. \quad (8)$$

Підстановка значень  $T_s$  (6) і  $F_\gamma$  (7) в  $\mu_\gamma$  (8) призводить до відомої формули [6] із системи (5) без значення кута  $\phi$

$$\mu_\gamma = (P_z' \cdot tg \gamma + P_N') / (P_z' - P_N' \cdot tg \gamma). \quad (9)$$

3. Задня поверхня  $A_\alpha$ . Значення  $F_\alpha$  визначається із (1) через  $F_\gamma$  (7) і  $\mu_\gamma$  (8, 9):

$$F_\alpha = P_z - F_\gamma (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_\gamma) \quad \text{і} \quad \tau_\alpha = F_\alpha / (h \cdot b). \quad (10)$$

Коефіцієнт тертя  $\mu_\alpha = F_\alpha / N_\alpha$  вираховується із (1)

$$\mu_\alpha = \frac{P_z - F_\gamma (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_\gamma)}{P_N - F_\gamma (\cos \gamma - \sin \gamma / \mu_\gamma)}. \quad (11)$$

3  $F_\gamma (\sin \gamma + \cos \gamma / \mu_\gamma) = P_z'$  і  $F_\gamma (\cos \gamma - \sin \gamma / \mu_\gamma) = P_N'$  із (1) при  $h = 0$

в (11) маємо

$$\mu_\alpha = \left( P_z - P_z' \right) / \left( P_N - P_N' \right). \quad (12)$$

### **Розрахунки і аналіз**

Емпіричні залежності (4) для загартованої інструментальної сталі 9ХС HRC=60 приведені в табл. 1.

Різальним матеріалом служив ПКНБ марки кіборіт у вигляді змінних пластин і марки ніборіт у вигляді вставок з напаяною пластиною на твердосплавній підложці.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів пропорційності  $C_p$  і показників степенів  $x-u$  в залежності (4) при кутах в плані  $\varphi = \varphi' = 45^\circ$ , задніх  $\alpha = \alpha' = 8^\circ$ , нахилу різальної кромки  $\lambda = 0^\circ$  і сухому різанні [7, 8]

Найменування сил, $H$	$C_p$	$x$	$y$	$-z$	$\eta$	$v$	$u$
		$t$ , мм	$s$ , мм/об	$v$ , м/с	$(1-\gamma/90)$	$(1+r)$ , мм	$(1+h)$ , мм
Дотична $P_z$	1554	0.85	0.67	0.18	0.6	0.15	0.6
Радіальна $P_y$	1133	0.87	0.64	0.12	1.4	0.23	1.5
Осьова $P_x$	671	0.96	0.53	0.13	1.2	-0.19	1.3

Значення раціональних параметрів (умов обробки) [7, 8], порядок і результати розрахунків елементних показників процесу різання зведені в табл. 2.

Виходячи з порівняльних даних табл. 2, найбільші дотичні напруження розвиваються в площині зсуву ( $\tau_s$ ), а найменші – на задній поверхні ( $\tau_\alpha$ ). В цілому значення  $\tau_\gamma$  і  $\mu_\gamma$  значно перевищують величини  $\tau_\alpha$  і  $\mu_\alpha$ . По мірі зношування леза відбувається незначне зменшення  $\tau_\alpha$  і  $\mu_\alpha$ .

Таблиця 2 – Розрахункові значення елементних показників  $\tau$  і  $\mu$  по залежностям (4) і табл. 1

Найменування вихідних параметрів і розрахункових показників		Значення параметрів і показників
		Сталь 9XC
Режим різання	глибина $t$ , мм	0.5
	подача $s$ , мм/об	0.2
	швидкість $v$ , м/с	1.0
Геометрія леза	кут $\gamma$ , град.	-20
	радіус $r$ , мм	1.6
	знос $h$ , мм	0.2/0.6
Переріз зрізу	товщина $a \cdot 10^{-3}$ , м	0.14
	ширина $b \cdot 10^{-3}$ , м	0.71
Сили при $r = 0, h = 0$	дотична $P_z'(4), H$	331
	нормальна $P_N'(4), (2), H$	348
Площина зсуву $P_\phi$	коефіцієнт $k_a$	1,5
	кут $\phi$ , град.	27
	довжина $l_s \cdot 10^{-3}$ , м	0,31
	сила $T_s(6), H$	136
	напруження $\tau_s(6)$ , МПа	618
Передня поверхня $A_\gamma$	довжина $l_\gamma \cdot 10^{-3}$ , м	0,61
	сила $F_\gamma(7), H$	214
	напруження $\tau_\gamma(7)$ , МПа	494
	коефіцієнт $\mu_\gamma(8), (9)$	0,50
Задня поверхня $A_\alpha$ при $h_1/h_2$	сила $P_z(4), H$	369/439
	сила $P_N(4), (2), H$	455/686
	сила $F_\alpha(10), H$	40/110
	напруження $\tau_\alpha(10)$ , МПа	282/258
	коефіцієнт $\mu_\alpha(11), (12)$	0,36/0,32



## **Висновки**

1. Отримано аналітично розрахункові формули для напружень в площині зсуву та для трибологічних показників на передній та задній поверхнях леза.

2. Значення дотичної та нормальної складових сили різання для гострого леза визначається на основі «емпірико-зворотнього» методу розрахунку.

3. Встановлено розрахункові значення напружень зсуву і контактних напружень та коефіцієнтів тертя на передній поверхні та на ділянці зносу задньої поверхні леза.

**Список використаних джерел:** 1. *Зорев Н.Н.* Вопросы механики процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 367 с. 2. *Розенберг А.М., Еремин А.Н.* Элементы теории процесса резания металлов. – М.: Машгиз, 1956. – 319 с. 3. *Абуладзе Н.Г.* Определение длины контакта сливной стружки с передней поверхностью инструмента. – Тр. Грузинского политехн. ин-та. – Тбилиси: ГПИ, 1969. – № 3. – С. 131-137. 4. *Розенберг Ю.А.* Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроения. – 2001. – № 3. – С.34-38. 5. *Кравченко Ю.Г., Дербабя В.А., Крюкова Н.В.* К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании. – Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015.– Вып. 85. – С.137-148. 6. *Макаров А.Д.* Износ и стойкость режущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с. 7. *Кравченко Ю.Г.* Параметрическая оптимизация условий точения закаленных сталей пластинами из ПКНБ. – Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 77. – С. 107-113. 8. *Кравченко Ю.Г., Пиньковский С.Г.* Выбор целевой функции оптимизационной модели процесса точения закаленной стали пластинами из ПКНБ. – Науковий вісник НГУ: Науч.-техн. журнал.– Дніпропетровськ: Нац. гор. ун-т, 2010. – № 7-8 (117-118). – С.68-73.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Zorev N.N.* Voprosy mehaniki processa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1956. – 367 s. 2. *Rozenberg A.M., Eremin A.N.* Jelementy teorii processa rezanija metallov. – M.: Mashgiz, 1956. – 319 s. 3. *Abuladze N.G.* Opredelenie dliny kontakta slivnoj struzhki sпередnej poverhnost'ju instrumenta. – Tr. Gruzinskogo politehn. in-ta. – Tbilisi: GPI, 1969. – № 3. – S. 131-137. 4. *Rozenberg Ju.A.* Metody analiticheskogo opredelenija stepeni deformacii metalla struzhki pri rezanii // Vestnik mashinostroenija. – 2001. – № 3. – S.34-38. 5. *Kravchenko Ju.G., Dербабя V.A., Kрюкова N.V.* K voprosu jempiricheskogo opredelenija naprjazhenij i koeficientov trenija pri struzhkoobrazovanii. – Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. науч.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2015.– Vyp. 85. – S.137-148. 6. *Makarov A.D.* Iznos i stojkost' rezhushhix instrumentov. – M.: Mashinostroenie, 1966. – 264 s. 7. *Kravchenko Ju.G.* Parametricheskaja optimizacija uslovij tochenija stalej plastinami iz PKNB. – Rezanie i instrument v tehnologicheskix sistemah: Mezhdunar. науч.-tehn. sb. – Har'kov: NTU «HPI», 2009. – Vyp. 77. – S. 107-113. 8. *Kravchenko Ju.G., Pin'kovskij S.G.* Vybora целеvoj funkcionnoy modeli processa tochenija zakalenoj stali plastinami iz PKNB. – Naukovij visnik NGU: Nauch.-tehn. zhurnal.– Dnipropetrovsk: Nac. gor. un-t, 2010. – № 7-8 (117-118). – S.68-73.

УДК 621.001.2

Н.В. Лищенко, канд. техн. наук, В.П. Ларшин, д-р техн. наук, Одесса,  
В.В. Нежебовский, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЬНОГО ЗУБОШЛИФОВАНИЯ НА СТАНКЕ С ЧПУ И СИСТЕМОЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПРИПУСКА**

*Розроблено та апробовано на прикладах два методи оптимізації технологічної операції профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК: шляхом порівняння альтернатив з використанням оціночної функції (сума квадратів відхилень) і шляхом пошуку екстремуму цільової функції. У першому випадку знаходять найкраще наближення за якістю оцінки екстремальних значень вимірюваного припуску в залежності від числа його вимірювань на етапі налагодження верстата. У другому – шляхом побудови моделі оптимізації у вигляді унімодальної функції, що має екстремум при оптимальному значенні того ж самого регульованого параметра – числа вимірювань припуску.*

**Ключові слова:** профільне зубошліфування, модель оптимізації, вимірювання припуску

*Разработаны и апробированы на примерах два метода оптимизации технологической операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ: путём сравнения альтернатив с использованием оценочной функции (сумма квадратов отклонений) и путём поиска экстремума целевой функции. В первом случае находят наилучшее приближение по качеству оценки экстремальных значений измеренного припуска в зависимости от числа его измерений на этапе настройки станка. Во втором – путём построения модели оптимизации в виде унимодальной функции, имеющей экстремум при оптимальном значении того же самого регулируемого параметра – числа измерений припуска.*

**Ключевые слова:** профильное зубошлифование, модель оптимизации, измерение припуска

*It is developed and tested on examples two methods to optimize a profile gear grinding operation on CNC machines: by comparing alternatives using the evaluation function (the sum of squared deviations), and by searching the objective function extremum. In the first case a better approximation is found by the evaluation quality criterion for the stock to be removed extreme values measured, depending on the number of its measurements on the machine set-up stage. In the second – by constructing an optimization model in the form of an unimodal function, having the extremum at the optimum value of the same controlled parameter – the number of the stock measurements.*

**Keywords:** profile gear grinding, optimization model, stock measurements

**Введение.** Изготовление зубчатых колёс (ЗК) – дорогостоящий и трудоёмкий технологический процесс, требующий высокой культуры производства, применения современного технологического оборудования, компьютерных средств и методов измерения. Для повышения эффективности этого процесса необходимо увеличивать производительность наиболее трудоёмких операций, к числу которых относятся операции лезвийной и абразивной обработки базовых и исполнительных поверхностей ЗК. Использование современных станков с ЧПУ от ведущих зарубежных фирм (Höfler, Reishauer, Siemens, Naas и других), взамен традиционного оборудования с ручным и цикловым управлением, явилось необходимым и

эффективным условием резкого увеличения производительности лезвийной и абразивной обработки в технологии изготовления ЗК. Технологическая диагностика этих операций на основе компьютерной системы сбора данных обуславливает возможность учёта технологической наследственности, которая проявляется между предыдущими (лезвийная обработка) и последующими (абразивная обработка) операциями. Однако для дальнейшего повышения производительности обработки на станках с ЧПУ необходима структурная и параметрическая оптимизация соответствующих мехатронных технологических систем, которые помимо собственно станка с ЧПУ включают правильно выбранный лезвийный и абразивный инструмент, СОТС и оптимальные режимы обработки. Именно оптимизация технологических операций на станках с ЧПУ по всем составляющим технологической системы позволит реализовать технологические принципы гибкого автоматизированного производства, которые позволяют перенести высокопроизводительные методы серийного производства на индивидуальное и мелкосерийное производство. Примером может быть гибкий производственный модуль на основе зубошлифовального станка с ЧПУ, имеющего автоматическую смену высокопористых шлифовальных кругов, спрофилированных на заданный модуль ЗК.

**Постановка проблемы.** Оптимизация в технике (engineering optimization) – быстро развивающаяся область науки, вытекающая из математической теории оптимизации технических систем: конструкций и процессов. Под теорией оптимизации понимают совокупность фундаментальных математических результатов и численных методов, ориентированных на нахождение и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернатив и позволяющих избежать полного перебора и оценивания возможных вариантов. Процесс оптимизации лежит в основе всей инженерной деятельности, поскольку классические функции инженера заключаются в том, чтобы, с одной стороны, проектировать новые более эффективные и менее дорогостоящие технические системы и, с другой стороны, разрабатывать методы повышения качества функционирования существующих систем [1]. Традиционная постановка задачи оптимизации включает ряд этапов: установление границ технической системы, определение количественного критерия для сравнительного анализа вариантов, выбор внутрисистемных переменных для определения характеристик и идентификации вариантов, построение модели, отражающей взаимосвязи между переменными. Корректная постановка задачи является необходимым условием успешного завершения оптимизационного исследования и «ассоциируется в большей степени с искусством, нежели с точной наукой» [1]. Следовательно, актуальной в технологии машиностроения является не только методика решения, но методика

постановки задачи оптимизации, в частности применительно к операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Применение оптимизационных исследований для операции зубошлифования на станках, работающих по методу обката тарельчатыми кругами, позволяет применить возможности оптимизации цикла обработки, для обеспечения наивысшей производительности (по объёму снятого материала за единицу времени) за счёт поиска экстремума унимодальной функции – машинного времени зубошлифования [2]. Однако применительно к методу копирования такая задача не поставлена и не решена. Кроме того, анализ состояния вопроса показывает, что основное внимание в имеющейся литературе уделено не постановке задач оптимизации, а математическим приёмам их решения как для классического случая унимодальной целевой функции (unimodal programming), так для известных методов математического программирования: линейного (linear), нелинейного (nonlinear), целочисленного (integer), сепарабельного (separable), квадратичного (quadratic) и других.

**Целью статьи** является разработка и исследование математической модели для постановки и решения задачи оптимизации профильного зубошлифования на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 по двум изучаемым направлениям оптимизации. Первое направление – оценка альтернативных вариантов с помощью разработанной оценочной функции, представляющей собой сумму квадратов отклонений (дисперсий) от достоверного, но трудоёмкого варианта построения операции (разомкнутое управление). Второе направление – формирование унимодальной целевой функции, имеющей экстремум (замкнутое управление при проектировании операции).

**Материалы исследования.** В соответствии с первым направлением оптимизации выполнили измерение припуска на боковых сторонах всех 40 впадин ЗК (код детали ДТМВ.478.БЭ.40.005). Из 40 измерений припуска выбирается возможное количество дискретных измерений: 2, 3, 4, 8, 10 и 20. После центрирования первой впадины выполняют доворот зубчатого колеса для выравнивания минимальных припусков по боковым сторонам впадин [3]. Фиксируют максимальные значения припуска на левой  $z_{\max}^L$  и правой  $z_{\max}^R$  стороне впадины ЗК и минимальную величину припуска (минимальные припуски на боковых сторонах одинаковы). Из двух зафиксированных максимальных значений припусков ( $z_{\max}^L$  и  $z_{\max}^R$ ) выбирают наибольшую величину, которую назовём максимаксом  $z_{\max}^{\max i}$  (максимальную из двух максимальных). Результаты замера припуска на этапе наладки станка сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Экстремальные значения припусков для колеса № 1 (в числителе) и колеса № 3 (в знаменателе)

Параметр	Количество измеряемых впадин, $N$						
	2	3	4	8	10	20	40
$z_{\max}^L$	0,3016 0,4441	0,2979 0,4711	0,3425 0,4441	0,3552 0,5885	0,3653 0,5831	0,3653 0,5653	0,3669 0,5725
$z_{\max}^R$	0,2117 0,3941	0,368 0,4081	0,3221 0,3941	0,3393 0,4045	0,3411 0,3692	0,3474 0,4160	0,3559 0,4215
$z_{\max}^{\max i}$	0,3016 0,4441	0,3680 0,4711	0,3425 0,4441	0,3552 0,5885	0,3653 0,5831	0,3653 0,5653	0,3669 0,5725
$z_{\min}^L =$ $z_{\min}^R$	0,2104 0,0069	0,1919 -	0,1861 0,0069	0,1733 -	0,1745 -	0,1745 -	0,1676 -

Данные о максимальных (максимакс  $z_{\max}^{\max i}$ ) и минимальных припусках ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ) использованы для определения дисперсий  $D_1$  ( $z_{\max}^{\max i}$ ) и  $D_2$  ( $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ ), соответственно (табл. 2 и 3). Дисперсия  $D_1$  представляет собой квадрат разности соответствующего припуска для сравниваемого варианта с аналогичным припуском, найденного по 40 измерениям. В данном случае базовым вариантом является 40 дискретных отсчетов. Например, для варианта  $N=2$  получим:  $D_1 = (0,3669-0,3016)^2 = 4270 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ ;  $D_2 = (0,1676-0,2104)^2 = 1827 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ . Сумма двух дисперсий:  $D_1 + D_2 = 6097 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ .

Таблица 2 – Оценочная функция для разного числа измерений колеса № 1

Параметр	Число измеряемых впадин, $N$					
	2	3	4	8	10	20
$D_1, \text{мм}^2$	$4270 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$597,8 \cdot 10^{-6}$	$136,89 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$
$D_2, \text{мм}^2$	$1827 \cdot 10^{-6}$	$590 \cdot 10^{-6}$	$340 \cdot 10^{-6}$	$32,5 \cdot 10^{-6}$	$47,61 \cdot 10^{-6}$	$47,61 \cdot 10^{-6}$
$D_1 + D_2, \text{мм}^2$	$6097 \cdot 10^{-6}$	$591 \cdot 10^{-6}$	$937,8 \cdot 10^{-6}$	$169 \cdot 10^{-6}$	$50,2 \cdot 10^{-6}$	$50,2 \cdot 10^{-6}$

Таблица 3 – Оценочная функция для разного числа измерений колеса № 3

Параметр	Число измеряемых впадин, $N$					
	2	3	4	8	10	20
$D_1, \text{мм}^2$	0,016486	0,010280	0,016486	0,000256	0,000111	0,000052
$D_2, \text{мм}^2$	0,003920	0,001267	0,003920	0,000408	0,000315	0
$D_1 + D_2, \text{мм}^2$	0,020406	0,011550	0,020406	0,000664	0,000426	0,000052

Результаты оценки по параметрам  $z_{\max}^{\max i}$  и  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$  для ЗК № 1 и №3 в порядке увеличения суммы дисперсий (ухудшения оценки) сведены в табл. 4, а на рис.1 приведен график изменения оценочной функции  $D_1 + D_2$  в зависимости от числа измерений  $N$ . Из рис.1 видно, что  $N_{opt} = 8$ .

Таблиця 4 – Результати оцінки по параметрам  $z_{\max}^{\max i}$  и  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$

Метод оцінки	ЗК № 1	ЗК № 3
Два параметра: $z_{\max}^{\max i}$ и $z_{\min}^L = z_{\min}^R$	10; 20;8;4;3;2	20;10;8;3;2; 4

Рассмотренный метод выбора оптимального решения вытекает из известного метода наименьших квадратов, в соответствии с которым выбирают такое приближение для уравнения регрессии, при котором минимизируется сумма квадратов отклонений (сумма дисперсий) между экспериментальными отсчётами величины и её теоретическими значениями по уравнению регрессии. В этом смысле указанная сумма дисперсий может быть оценочной функцией для сравнения альтернативных вариантов. Один из этих вариантов должен быть предпочтительным по точности оценки, но может уступать другим вариантам по другим критериям, например, по трудоёмкости возможного построения технологической операции.

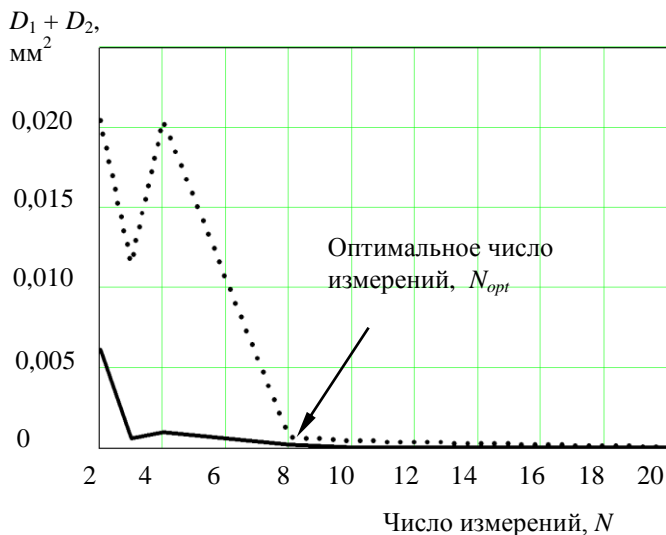


Рисунок 1 – Изменение оценочной функции  $D_1 + D_2$  для ЗК №1 (сплошная линия) и ЗК № 3 (пунктирная линия)

При зубошлифовании методом копирования возможно применение двух циклов съема припуска с боковых поверхностей впадин: без вариабельности с вариабельностью. В первом случае (без вариабельности) цикл съема припуска

при зубошлифовании заключается в фиксации максимакса (максимального значения из двух максимальных значений припуска) после выравнивания минимальных припусков по боковым сторонам впадин. Этот «максимаксный» припуск распределяется на этапы и рабочие ходы. Цикл шлифования выполняется с впадины с максимаксным припуском (фиксация точки касания круга и указанной выше впадины). Данный цикл съёма припуска сопровождается «шлифованием воздуха», когда припуск в отдельной впадине меньше, чем максимальный припуск. Каждая впадина зубчатого колеса шлифуется за одинаковое число ходов, найденное исходя из максимального припуска. Для устранения «шлифования воздуха» необходимо использовать индивидуальное распределение припуска по впадинам зубчатого колеса. Эта возможность реализована в опции «вариабельность». Во втором случае (с вариабельностью) каждая впадина шлифуется за разное число ходов согласно индивидуальному припуску на отдельной впадине, который измерен встроенной системой измерения припуска на станке с ЧПУ.

Для обоих случаев (без вариабельности и с вариабельностью) необходимо назначить добавку на припуск, которая зависит от числа измеренных впадин. Чем меньше впадин измерено, тем большую добавку к припуску надо назначить на максимаксовый припуск. Поэтому появилась задача определения добавки к припуску, зависящей от числа измерений. Рассмотрим эту задачу для первого случая (без вариабельности).

В соответствии со вторым направлением оптимизации выполнен ряд исследований с использованием экспериментальных данных, полученных на зубошлифовальном станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250. Выявлены две противоположные тенденции, зависящие от одной и той же независимой переменной – числа  $N$  измерений припуска на заготовке ЗК. Штучное время зубошлифования на станке с ЧПУ и встроенной системой измерения припуска складывается из двух составляющих: времени измерения  $T_{изм}$  фактического расположения припуска на заготовке (этап наладки станка) и времени обработки  $T_{обр}$ , зависящего от фактического расположения измеренного припуска по правой и левой стороне впадин ЗК (этап обработки), т.е.

$$T_{шт} = T_{обр} + T_{изм}, \quad (1)$$

где  $T_{шт}$  – переменная часть штучного времени операции, мин.

Достоверная информация о припуске по всем впадинам ЗК позволяет учитывать при обработке индивидуальные особенности заготовки и, как следствие, минимизировать непроизводительные затраты времени при уменьшении припуска. Степень достоверности этой информации зависит от числа  $N$  измерений припуска. Очевидно, что максимальное число измерений равно числу впадин (или числу зубьев) ЗК и предпочтительно для получения

максимально достоверной информации. Однако с ростом числа измерений штучное время операции (в минутах) увеличивается на время измерений в соответствии с формулой

$$T_{\text{изм}} = \frac{1}{60}(T_1 + T_2 + T_3 + T_4), \quad (2)$$

где  $T_1$  – время на развёртывание тактильного прибора в измерительную позицию и его возврат в исходную позицию, с;  $T_2 = mN$  – время, затрачиваемое на  $N$  измерений ( $N$  – количество измеряемых впадин), с;  $m$  – время цикла измерительных перемещений ЗК при касании щупом датчика правой и левой сторон впадины, с;  $T_3 = m'N$  – суммарное время на  $N$  вводов и выводов щупа датчика, с;  $m'$  – время одного цикла ввода-вывода щупа, с;  $T_4 = k(N)\tau_r$  – время на один полный поворот ЗК при измерении припуска, с;  $k(N) > 1$  – переменный коэффициент, учитывающий неравномерность вращения ЗК при его старт-стопном режиме движения;  $\tau_r$  – время на один полный поворот ЗК при его равномерном движении, с.

Зависимость коэффициента  $k(N)$  от величины  $N$  установлена экспериментально на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 методом хронометража и имеет следующий вид:

$N$	2	4	8	10	20	40
$k(N)$	1,0	1,2	1,4	1,5	2,0	2,5.

В свою очередь

$$T_4 = k(N) \frac{1}{V} \frac{2\pi R}{z} \frac{z}{N} = k(N) \frac{2\pi R}{V}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус измерительной окружности, м;  $z$  – число зубьев;  $V$  – линейная скорость точки на измерительной окружности ЗК, м/с; Учитывая, что  $V = \omega R$ , где  $\omega = \pi n / 30$  – угловая скорость ЗК (рад/с),  $n$  – частота вращения заготовки ЗК при измерении припуска (мин<sup>-1</sup>), выражение (3) принимает вид

$$T_4 = 60 \frac{k(N)}{n} \quad (4)$$

Возвращаясь к уравнению (2) получаем

$$T_{\text{изм}} = \frac{T_1}{60} + \frac{m+m'}{60} N + \frac{k(N)}{n} \quad (5)$$

Видно, что с увеличением числа измерений  $N$  время измерения возрастает (первая тенденция из двух противоположных альтернатив в математической модели оптимизации). Ранее в качестве измерительного элемента был рассмотрен щуп тактильного прибора компании Renishaw. В практике возможен метод измерения припуска шлифовальным кругом



(при пониженной частоте его вращения) по сигналу акустической эмиссии (АЭ) при касании. Такой метод применяют для измерения заготовок после их термообработки, когда высокая точность контроля щупом не соответствует неудовлетворительному качеству измеряемой (после термообработки) поверхности. Принимаем для расчета:  $T_1 = 5(8)$  с;  $m = 20$  (5) с;  $m' = 5$  (5) с (в скобках указаны данные для измерения припуска щупом);  $n = 20$  мин<sup>-1</sup>. Для измерения припуска по сигналу АЭ формула (5) принимает вид (в минутах)

$$T_{\text{изм}} = \frac{5}{60} + \frac{20+5}{60}N + \frac{k(N)}{20} \quad (6)$$

Основное время зубошлифования (в минутах), т.е. время обработки  $T_{\text{обр}}$ , можно найти по выражению, которое соответствует структуре технологической операции зубошлифования

$$T_{\text{обр}} = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} i + \frac{\tau_{\text{дел}}}{60} \right) z, \quad (7)$$

где  $b$  – ширина зубчатого венца, мм;  $l_1, l_2$  – величина пути врезания и перебега, мм;  $S$  – подача, мм/мин;  $i = z_{\text{max}}^{\text{maxi}} / t_n$  – число ходов с подачей  $S$  для удаления припуска  $z_{\text{max}}^{\text{maxi}}$ , мм;  $t_n$  – глубина шлифования;  $\tau_{\text{дел}}$  – время деления ЗК, с;  $z$  – число впадин (или зубьев) ЗК.

Например, для исследуемой заготовки ЗК:  $b = 24$  мм;  $l_1 = l_2 = 7,9$  мм;  $S = 7000$  мм/мин;  $\tau_{\text{дел}} = 5$  с;  $z = 40$ ;  $t_n = 0,015$  мм;

Для установления тенденции, в соответствии с которой увеличение числа измерений приводит к уменьшению времени обработки по уравнению (1), выполнено дополнительное исследование, позволяющее установить влияние числа  $N$  измерений припуска на величину расчётного максимального припуска, которую задают в устройство ЧПУ станка перед обработкой. Чем меньше фактическое число  $N$  измерений, тем большую величину максимального расчётного припуска задают. В данном случае расчётный припуск рассматривается как статистический параметр, который может иметь доверительный интервал (confidence interval). Доверительным называют интервал, который покрывает неизвестный параметр с заданной надёжностью [4]. Теория доверительных интервалов в основном касается линейных уравнений регрессии. Поэтому для использования теоретических положений задачу сводят к линейному виду с помощью соответствующих приёмов. Это следует из принципа обратной связи между постановкой задачи и вычислением её результата. В соответствии с этим принципом «точная постановка всей задачи возможна лишь после начала вычислений» [5].

Для получения зависимости между расчётным припуском  $z_{\text{max}}^{\text{maxi}}$  на зубошлифование и числом измерений разработана следующая методика.

1. Производят дискретные измерения припуска на боковых сторонах всех впадин ЗК, например, на всех 40 впадинах (после штатного центрирования припуска в первой начальной впадине).

2. Рассматривают все возможные варианты задания числа измерений припуска ( $N = z$ ;  $N = z/2$ ;  $N = z/3$ ;  $N = z/4$  и т.д.). Например, для рассматриваемой заготовки ДТМВ.478.БЭ.40.005 с 40 впадинами выбранное число  $N$  измерений составляет: 40, 20, 10, 8, 4 и 2.

3. Для каждого из  $N$  вариантов выполняют выравнивание минимальных припусков (штатная процедура на станке с ЧПУ), т.е. обеспечивают условие  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ .

4. Фиксируют максимальную величину припуска  $z_{\max}^{\max i}$ , названную максимаком (табл.5).

Таблица 5 – максимаксные значения припуска и добавки к ним для заготовки № 1

Параметр	Число измерений						
	0	2	4	8	10	20	40
$z_{\max}^{\max i}$ , мм	0,8	0,3016	0,3425	0,3552	0,3653	0,3653	0,3669
$\Delta z$ , мм	0,433	0,065	0,024	0,012	0,002	0,002	–

5. Находят величину доверительного интервала (добавка  $\Delta z$  от неопределённости припуска) в виде разности по модулю между максимаком при  $N = z$  и текущими максимаками для каждого из вариантов, установленных в п. 2 (табл. 5).

6. Выбирают доверительный интервал для  $N = 0$  (при отсутствии измерений). Этот припуск соответствует значению, выбранному на этапе технологической подготовки производства, например, 0,5-0,8 мм.

7. Строят график добавок припуска  $\Delta z$ , найденных в п.5 и аппроксимируют эти точки экспоненциальной зависимостью. В данном случае эта зависимость имеет вид  $\Delta z = 0,5 \exp(-0,5N)$ .

8. Формируют зависимость  $z(N)$  как функцию от числа измерений  $N$ :  $z(N) = z_{\max}^{\max i} + \Delta z$  т.е.  $z(N) = 0,367 + 0,5 \exp(-0,5N)$ . Припуск равен сумме максимаксного припуска при максимальном числе измерений ( $z_{\max}^{\max i}$  при  $N = z = 40$ ) и добавки  $\Delta z$ , найденной в п. 7.

9. Задают подачу на сторону на один ход (например,  $t_n = 0,015$  мм).

10. Формируют уравнение для определения числа рабочих ходов  $i$ , зависящее от  $z(N)$  и  $t_n$ , т.е.  $i(N) = z(N) / t_n$ .

11. На основании формулы (7) получают уравнение для времени обработки  $T_{\text{обр}}$  как функцию от  $i(N)$ , т.е.

$$T_{обр} = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} i(N) + \frac{\tau_{дел}}{60} \right) z = \left( \frac{b+l_1+l_2}{S} \frac{z(N)}{t_n} + \frac{\tau_{дел}}{60} \right) z. \quad (8)$$

Видно, что с увеличением числа измерений  $N$  время обработки  $T_{обр}$  уменьшается за счёт уменьшения расчётного припуска  $z(N)$  (вторая тенденция из двух противоположных альтернатив в математической модели оптимизации).

12. Формируют уравнение для времени измерения  $T_{изм}$  по формуле (5).

13. Формируют целевую функцию – штучное время (1) на зубошлифование. Для приведенных выше данных целевая функция представлена на графике (рис. 2).

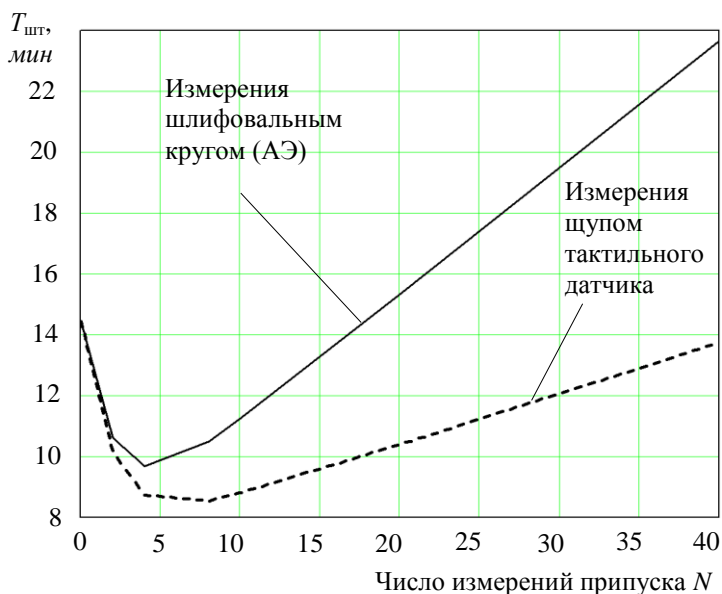


Рисунок 2 – Штучное время зубошлифования  $T_{шт}$  в зависимости от числа  $N$  измерений припуска во впадинах ЗК №1 для разных способов измерения припуска (АЭ – сигнал акустической эмиссии)

14. Находят производную целевой функции (1) с учётом приведенных выше данных.

15. Приравнивают производную нулю и определяют оптимальную величину параметра  $N$ , т.е.  $N_{opt}$ , при котором целевая функция имеет экстремум. Также число  $N_{opt}$  можно найти графически по рис.2, где  $N_{opt} = 4$  (измерения шлифовальным кругом) и  $N_{opt} = 8$  (измерения щупом). В обоих случаях число измерений меньше максимально возможного числа  $N = 40$ .

## **Выводы и перспективы развития**

1. Разработаны и апробированы теоретические предпосылки по оптимизации операции профильного зубошлифования на станке с ЧПУ, в соответствии с которыми оптимизацию выполняют либо путём сравнительной оценки альтернативных вариантов по минимуму отклонения оптимального варианта от наиболее достоверного, но трудоёмкого варианта (разомкнутое управление), либо путём поиска экстремума унимодальной целевой функции (замкнутое управление). В обоих случаях с позиции теории технических систем оптимизация рассматривается как метод управления при проектировании технологической операции зубошлифования.

2. Выявлены две противоположные тенденции, зависящие от одной и той же независимой переменной – числа измерений припуска на заготовке зубчатого колеса. Первая тенденция: с ростом числа измерений штучное время операции увеличивается на величину времени измерения. Вторая тенденция: с ростом числа измерений штучное время операции уменьшается в связи с уменьшением расчётного припуска на зубошлифование. Сформирована целевая функция, представляющая собой сумму времени измерения и времени обработки. Показано, что эта функция имеет экстремум (минимум) при оптимальном числе измерений припуска.

3. На конкретном примере обработки заготовок зубчатых колёс на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 показаны основные этапы формирования математической модели оптимизации операции зубошлифования на станке с ЧПУ. Разработанная модель представляет собой унимодальную функцию – переменную часть штучного времени операции, содержащую время измерения и время обработки, каждое из которых зависит от числа измерений припуска на этапе наладки станка.

4. Разработаны технологические рекомендации по выбору числа измерений припуска на этапе наладки зубошлифовального станка с ЧПУ, оснащённом соответствующей измерительной системой, например, тактильной системой компании Renishaw или модернизированной системой измерения на основе контроля сигнала акустической эмиссии при касании шлифовального круга и боковой стороны впадины заготовки зубчатого колеса. Например, для рассмотренного примера оптимальное число измерений припуска составляет 4 (измерения шлифовальным кругом по сигналу акустической эмиссии) и 8 (измерения шупом тактильного датчика) из 40 возможных измерений.

**Список использованных источников:** 1. Реклейтис Г. Оптимизация в технике: В двух книгах. Кн. 1. Пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэтсдел. – М.: Мир, 1986. – 349 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 8. "Оптимизация технологических процессов в машиностроении" / Ф.В. Новиков, А.В. Якимов, Г.В. Новиков, А.А. Якимов, В.П. Ларшин и др. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 509 с. 3. Ларшин В.П. Выравнивание

припуска по профілю при наладке на зубшлифование методом копіювання / *В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко* // *Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкция металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: материалы VI Всерос. межвуз. науч.-техн. конф.* – Уфа: УГАТУ, 2016. – С.181-189. **4.** *Фёрстер Э.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов. Пер. с нем. и предисл. В.М. Ивановой / *Э. Фёрстер, Б. Рёнц.* – М.: Финансы и статистика, 1983. – 303 с. **5.** *Хемминг Р.В.* Численные методы для научных работников и инженеров. Пер. англ. В.А. Арлазарова и др. Изд. второе, испр. / *Р.В. Хемминг.* – М.: Наука, 1972. – 400 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Rekleytis G.* Optimizatsiya v tekhnike: V dvukh knigakh. Kn. 1. Per. s angl. / *G. Rekleytis, A. Reyvindran, K. Retsdel.* – М.: Mir, 1986. – 349 s. **2.** *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroeniya. Pod obshch. red. F.V. Novikova i A.V. Yakimova. V desyati tomakh.* – Т. 8. "Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroeniі" / *F.V. Novikov, A.V. Yakimov, G.V. Novikov, A.A. Yakimov, V.P. Larshin i dr.* – Odessa: ONPU, 2004. – 509 s. **3.** *Larshin V.P.* Vyravnivanie pripuska po profilyu pri naladke na zuboshlifovanie metodom kopirovaniya / *V.P. Larshin, N.V. Lishchenko* // *Sovremennye tendentsii v tekhnologiyakh metalloobrabotki i konstruksiyakh metalloobrabatyvayushchikh mashin i komplektuyushchikh izdeliy: materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf.* – Ufa: UGATU, 2016. – S.181-189. **4.** *Ferster E.* Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza. Rukovodstvo dlya ekonomistov. Per. s nem. i predisl. V.M. Ivanovoy / *E. Ferster, B. Rents.* – М.: Finansy i statistika, 1983. – 303 s. **5.** *Khemming R.V.* Chislennye metody dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Per. angl. V.A. Arlazarova i dr. Izd. vtoroe, ispr. / *R.V. Khemming.* – М.: Nauka, 1972. – 400 s.

УДК 621.9.048

А.В. Мицьк, канд. техн. наук., В.А. Федорович, д-р техн. наук  
Харьков, Україна

## **ВОЗМОЖНОСТИ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ И ГИБРИДНОГО СТАНКА ВИБРАЦИОННОГО И ДВОЙНОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Викладено можливості мультиенергетичної технології оздоблювально-зачищувальної віброобробки. Встановлено зв'язок технологічних показників виробів з якістю їх поверхневого шару. Описано застосування віброобробки у виготовленні деталей тіл обертання і корпусних деталей складної форми. Викладено основні принципи створення і досвід промислового впровадження мультиенергетичної оздоблювально-зачищувальної технології та обробки і гібридного вібростанка динамічної дії.*

**Ключові слова:** *вібраційна обробка, гібридний станок, відцентрова динаміка, вібраційні технології*

*Изложены возможности мультиэнергетической технологии отделочно-зачистной виброобработки. Установлена связь технологических показателей изделий с качеством их поверхностного слоя. Описано применение виброобработки в изготовлении деталей тел вращения и корпусных деталей сложной формы. Изложены основные принципы создания и опыт промышленного внедрения мультиэнергетической отделочно-зачистной технологии и обработки и гибридного вибростанка динамического действия.*

**Ключевые слова:** *вибрационная обработка, гибридный станок, центробежная динамика, вибрационные технологии*

*Capabilities of multi-energy vibration finishing treatment technology are set. Connection between technological parameters of products with surface layer quality established. Vibration treatment application in production of rotation body parts and complex shape body parts described. Basic principles of creation and industrial implementation experience of multi-energy finishing technology and treatment and dynamic impact hybrid vibration machine-tool are set.*

**Keywords:** *vibration treatment, hybrid machine-tool, centrifugal dynamics, vibration technologies*

### **Общие сведения**

Процесс постоянного совершенствования машиностроения активизирует развитие технологического и станкостроительного сегментов, так как наряду с другими видами высокотехнологичного производственного оснащения парк современных металлорежущих станков и технологий, включающих гибридные вибростанки и мультиенергетические технологии для отделочно-зачистной обработки, обеспечивают рост производственного потенциала при выпуске новых видов конкурентоспособной продукции уровня мировых стандартов [1].

Практика металлообрабатывающих производств указывает, что вибрационная обработка является наиболее распространенным процессом

отделочно-зачистной обработки [2]. К ее очевидным достоинствам – простоте использования, высокой производительности, хорошим качеством обработки, следует добавить то, что она самым непосредственным образом повышает надежность и долговечность изделий.

### **Связь технологических показателей изделий с качеством поверхностного слоя**

Установлено, что эти технологические показатели напрямую связаны и в большинстве случаев зависят от высоты микронеровностей сопрягаемых поверхностей. Так, износ поверхностей при трении скольжения имеет усталостный характер растрескивания поверхностного слоя под влиянием повторных механических и термических напряжений [3]. При этом интенсивность изнашивания определяется размерами и формой неровностей, которые для износостойкости имеют первостепенное значение.

Выявлено, что в зубчатых передачах рабочие поверхности зубьев тем лучше сопротивляются усталостному разрушению, чем меньше их неровности [4].

В подшипниках качения зависимость шума и вибрации непосредственно связаны с шероховатостью поверхности [5].

Влияние неровностей поверхности на коррозию металлов близко по характеру к влиянию их на усталостное разрушение [6].

Характер микрошероховатости также существенно влияет на контактную жесткость и виброустойчивость различных механизмов [7].

Таким образом, на основании приведенных данных можно сделать вывод о том, что параметры микрорельефа рабочих поверхностей детали различных машин и механизмов как на этапе их изготовления, так и при их эксплуатации, являются первостепенными в плане повышения качества промышленных изделий.

### **Применение технологии виброобработки в изготовлении деталей тел вращения**

Принимая во внимание технологические возможности вибрационной обработки, в которые входит выполнение таких, связанных с уменьшением высоты микронеровностей отделочно-зачистных операций как шлифование до  $R_a = 0,63$  мкм, чистовое шлифование до  $R_a = 0,32$  мкм, тонкое шлифование до  $R_a = 0,16$  мкм, полирование до  $R_a = 0,08$  мкм, можно предположить, что такие технологические и конструктивные методы вполне приемлемы для автоматизации и механизации малопроизводительных ручных операций, направленных на повышение класса частоты поверхности деталей и как результат на снижение себестоимости и увеличение качественного уровня изделий.

В производстве применяется технология виброобработки деталей типа тел вращения, которая состоит в том, что обрабатываемые детали поодиночно или пакетами устанавливают в приспособлении на вертикальном шпинделе, который приводят во вращательное движение и погружают в рабочую зону подпружиненного резервуара, заполненного рабочей средой, который совершает плоские колебательные движения. В циркуляционных потоках содержимого резервуара микрорезанием и упругопластическим деформированием проводят обработку, удаляют дефектный слой металла, уменьшают шероховатость поверхности [8].

### **Эффективность технологии виброобработки для корпусных деталей сложной формы**

Несмотря на промышленное применение известная технология и соответствующие ей конструкции вибростанков недостаточно эффективны для корпусных деталей сложной формы, образованных сочетанием цилиндрических и криволинейных поверхностей. Обработка таких деталей в условиях традиционного вибрационного воздействия рабочей среды не обеспечивает полного удаления дефектов в труднодоступных для гранул среды местах поверхности детали, таких как ниши, карманы, глухие отверстия и др. по причине того, что кинематическая активность гранул в их циркуляции требует дополнительного осциллирующего движения, которое формируется при действии на среду комбинированной схемы энергетических воздействий.

### **Основные принципы создания мультиэнергетической отделочно-зачистной технологии обработки и гибридного вибростанка**

В основу создания новой мультиэнергетической технологии и гибридного вибростанка положена модернизация описанной выше известной технологии виброобработки путем того, что обработку проводят при одновременном использовании энергии вибрационных и центробежных сил, которые влияют на рабочую среду, формирующие свойства которой, обеспечивающие микрорезание и упругопластическое деформирование выявляются при равномерном и стабильном контакте с обрабатываемой поверхностью любой сложности. Такая комбинированная схема энергетического воздействия формируется в резервуаре, который имеет форму совмещенных по условной площади основ пустотелых фигур цилиндра и усеченного конуса с большей вертикальной осью [9].

Импеллер в виде усеченного конуса с гофрированной поверхностью, которая вращается, установлен большим основанием к днищу резервуара через вал импеллера, который находится вне резервуара, жестко связанного с инерционным вибровозбудителем, а затем последовательно через гибкую



муфту с валом конического редуктора и с помощью клиноременной передачи с электродвигателем. При этом ось вала инерционного вибровозбудителя, конструктивно расположенного вблизи к нижней внешней части резервуара, совпадает с вертикальной осью резервуара и перпендикулярна его сечению в площади колебаний (рис. 1).

Обрабатываемые детали поодиночно или пакетами устанавливаются на расположенных по концентрическим окружностям установочных пальцев многоместного приспособления, связанного со шпинделем передачей двухпарного зацепления цилиндрических зубчатых колес, которое имеет возможность погружения в рабочую зону резервуара и выхода из нее до и после обработки.

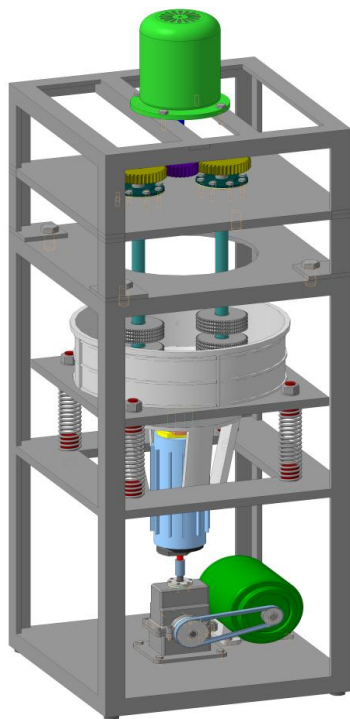
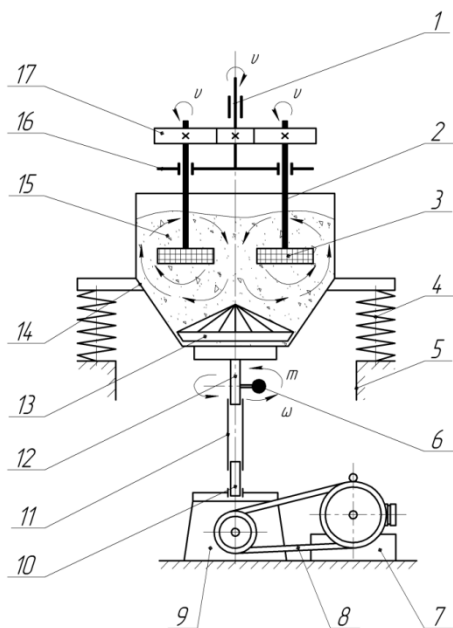


Рисунок 1 – Принципиальная схема и общий вид компютеризированной гибридной вибростанка вибрационного и центробежного динамического воздействия

При таком аппаратном оформлении технологии, которое сопровождается одновременным действием на рабочую среду и обрабатываемые детали энергии вибрационных и центробежных сил в

резервуаре формируется комбинированная схема энергетических действий, которые создают общий циркуляционный и осциллирующий характер движения гранул рабочей среды, свободно проникающих ко всем труднодоступным поверхностям обрабатываемых деталей. Все это приводит к высокой интенсивности обработки, управление которой совершают при выборе рациональных амплитудно-частотных параметров колебательного движения резервуара, а также скоростей вращательных движений импеллера и шпинделя вибростанка.

В качестве рабочей среды используется шлифзерно зернистостью 200...40 и шлифпорошки зернистостью 32...16, а также абразивные и металлические гранулы с размером 2...15 мм смоченные химически активным раствором. Вращательное движение от электродвигателя передается со скоростью 50...1440 об/мин, колебательное движение от вибровозбудителя, расположенного на валу импеллера, с частотой 30...70 Гц и амплитудой 0,2...3,0 мм. Шпинделю вибростанка, связанного с многоместным приспособлением с обрабатываемыми деталями передают вращательное движение со скоростью 31,5...1400 об/мин.

Наименьшее расстояние  $L$  между рабочей поверхностью резервуара и импеллера, а также поверхностями обрабатываемых деталей, для обеспечения неразрывного вращательного и колебательного движения среды выбирается из условия  $L \geq b$ , где  $b$  – наибольший габаритный размер обрабатываемой детали, высота  $H$  резервуара из условий обеспечения равномерности давления среды во всех его зонах приблизительно равна  $3R+h$ , то есть  $H \approx 3R+h$ , радиус  $R$  цилиндрической части резервуара составляет  $(1,5...1,6)r$ , то есть  $R \approx (1,5...1,6)r$ , где  $r$  – радиус основания резервуара, высота  $h$  импеллера с целью регулирования взаимодействия рабочей среды и обрабатываемых деталей принимается равной  $(0,1...0,2)H$ , то есть  $h \approx (0,1...0,2)H$ .

### **Опыт промышленного внедрения мультиэнергетической технологии и гибридного вибростанка динамического действия**

Выполняли операцию отделочно-зачистной обработки по удалению заусенцев, скруглению острых кромок, а также виброшлифованию с целью уменьшения шероховатости поверхности до  $R_a = 0,63...0,32$  мкм на заготовках деталей корпусов гидropневмосистем после предшествующей обработки на металлорежущих станках, связанной с операциями фрезерования сложных по форме поверхностей и сверления сквозных и глухих отверстий различного диаметра. Материал заготовок алюминиевый сплав АЛ 7 ГОСТ 1583-93. Технологический метод получения заготовок – отливка в кокиль. Толщина заусенцев у основания 0,15...0,22 мм. Исходная

шероховатость поверхности соответствует  $R_a = 2,5...1,25$  мкм. Форма заготовок сложная, образованная различными сочетаниями цилиндрических и криволинейных поверхностей, имеют место ниши, карманы, а также многоступенчатые переходы элементов поверхности. Наибольший габаритный размер заготовки не превышает 120 мм.

Отделочно-зачистная обработка проводилась на гибридном вибростанке, резервуар которого для интенсификации движения рабочей среды был снабжен импеллером в виде усеченного конуса высотой 100 мм. Объем резервуара позволял установить пакетами в приспособлении шпинделя 16 заготовок. В качестве рабочей среды использовались минералокерамические гранулы произвольной формы с размером 1,8...2 мм. Как жидкий компонент при обработке применялся химически-активный раствор на щелочной основе. Режимы обработки: скорость вращения шпинделя 1000 об/мин; скорость вращения импеллера 1440 об/мин; частота и амплитуда колебаний резервуара 50 Гц, 1,6...1,8 мм. Машинное время обработки 30...35 мин. Дефекты поверхности удалены полностью, достигнута требуемая шероховатость поверхности при естественном оттенке металла. Сортировочный контроль качества отделочно-зачистной обработки появления брака не установил.

## **Выводы**

Таким образом, представляет технологический и экономический интерес попытка создания гибридного вибростанка в виде агрегатированной технологической системы отделочно-зачистной обработки, при компоновке которой используется синтез воздействия вибрационной силы, реализуемой вибровозбудителем, а также центробежных сил, реализуемых импеллером и шпинделем.

Предлагаемая разновидность способа виброобработки позволяет расширить ее технологические возможности применяя мелкодисперсную рабочую среду в виде шлифзерна, различных шлифпорошков, керамических и стеклянных абразивных сред сферической формы, размер гранул которых не превышает 2 мм, что положительно отражается на обработке номенклатуры вышеупомянутых корпусных деталей сложной формы.

**Список использованных источников:** 1. *Бабичев А.П.* Технологическое применение колебаний или ... вибрационные технологии / *А.П. Бабичев* // Вестник ДГТУ. – 2005. – Т. 5, № 3 (25). – С. 289 – 301. 2. *Бабичев А.П.* Основы вибрационной технологии / *А.П. Бабичев, И.А. Бабичев.* – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 694 с. 3. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Наука. – 1975. – 145 с. 4. *Старжинский В.Е.* Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. – СПб.: Профессия, 2007, – 823 с. 5. *Черменский О.Н., Федотов Н.Н.* Подшипники качения. Справочник-каталог. – М.: машиностроение, 2003. – 576 с. 6. *Семенова И.В.* Коррозия и защита от коррозии / *Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В.* – М.: Физматлит, 2002. – 335 с. 7. Машиностроение. Энциклопедия. Ред. Совет: *К.В. Фролов (пред.) и др.* – М.: Машиностроения. Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. В 2-х кн. Кн. 2 / *А.В. Александров, Н.А. Алфутов, В.В. Астанин и др.*

Под общ. ред. *К.С. Колесникова*. 1995. – 624 с. **8.** Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка, мойка, удаление облоя и заусенцев, обработка кромок) / *А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др.*; под ред. *А.П. Бабичева*. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010. – 289 с. **9.** *Mamalis A.G., Kundrak J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A.* Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. *Journal of Machining and Forming Technologies*. 2015. 7, 1-10.

**Bibliography (transliterated):** **1.** *Babichev A.P.* Tehnologicheskoe primenenie kolebanij ili ... vibracionnye tehnologii / *A.P. Babichev* // *Vestnik DGTU*. – 2005. – Т. 5, № 3 (25). – С. 289 – 301. **2.** *Babichev A.P.* Osnovy vibracionnoj tehnologii / *A.P. Babichev, I.A. Babichev*. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2008. – 694 s. **3.** *Kragel'skij I.V.* Trenie i iznos. – М.: Nauka. – 1975. – 145 s. **4.** *Starzhinskij V.E.* Tehnologija proizvodstva i metody obespechenija kachestva zubchatyh koles i peredach. – SPb.: Professija, 2007, – 823 s. **5.** *Chermenskij O.N., Fedotov N.N.* Podshipniki kachenija. Spravochnik-katalog. – М.: mashinostroenie, 2003. – 576 s. **6.** *Semenova I.V.* Korrozija i zashhita ot korrozii / *Semenova I.V., Florianovich G.M., Horoshilov A.V.* – М.: Fizmatlit, 2002. – 335 s. **7.** Mashinostroenie. Jenciklopedija. Red. Sovet: *K.V. Frolov (pred.) i dr.* – М.: Mashinostroeniija. Dinamika i prochnost' mashin. Teorija mehanizmov i mashin. Т. 1-3. V 2-h kn. Kn. 2 / *A.V. Aleksandrov, N.A. Alfutov, V.V. Astanin i dr.* Pod obshh. red. *K.S. Kolesnikova*. 1995. – 624 s. **8.** Primenenie vibracionnyh tehnologij na operacijah odelochno-zachistnoj obrabotki detalej (ochistka, mojka, udalenie obloja i zausenecv, obrabotka kromok) / *A.P. Babichev, P.D. Motrenko, L.K. Gillespi i dr.*; pod red. *A.P. Babicheva*. – Rostov n/D: Izdatel'skij centr DGTU, 2010. – 289 s. **9.** *Mamalis A.G., Kundrak J., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A.* Development of Modular Machine Design and Technologies of Dynamic Action for Finishing-Grinding Treatment by an Oscillating Abrasive Medium. *Journal of Machining and Forming Technologies*. 2015. 7, 1-10.

УДК 621.923

І.М. Піжов, д-р техн. наук, Харків, В.Г. Клименко, Полтава, Україна

## **ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОЩІ КОНТАКТУ РІЗАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРУГУ З ДЕТАЛЛЮ ПРИ ПЛОСКОМУ ТОРЦЕВОМУ ШЛІФУВАННІ З ПОПЕРЕДНІМ НАХИЛОМ ОСІ ШПИНДЕЛЯ**

*Розглянуто питання, пов'язані з підвищенням ефективності процесу плоского торцевого шліфування за рахунок створення теоретичних передумов управління площею контакту круга з деталлю, а, отже, і теплонпруженістю процесу обробки в цілому. Стосовно до окремих випадків характеру контакту круга з деталлю запропоновані аналітичні залежності, які пов'язують значення площі з умовами обробки.*

**Ключові слова:** *плоске торцеве шліфування, температура шліфування, торцевий круг, кут нахилу осі шпинделя, площа контакту, ріжуча поверхня круга, схема шліфування, параметри зони контакту*

*Рассмотрены вопросы, связанные с повышением эффективности процесса плоского торцевого шлифования за счет создания теоретических предпосылок управления площадью контакта круга с деталью, а, следовательно, и теплонпряженностью процесса обработки в целом. Применительно к частным случаям характера контакта круга с деталью предложены аналитические зависимости, которые связывают значение площади и условиями обработки.*

**Ключевые слова:** *плоское торцевое шлифование, температура шлифования, торцовый круг, угол наклона оси шпинделя, площадь контакта, режущая поверхность круга, схема шлифования, параметры зоны контакта*

*The problems associated with the increase of efficiency of process of flat face grinding by creating the theoretical preconditions management area of contact with the workpiece range, and hence the thermal stress of the whole process of processing. With regard to individual cases the nature of the contact circle detail Analytical dependencies that tie the value of the area and the processing conditions.*

**Keywords:** *flat mechanical grinding, grinding temperature, allen circle, the angle of the spindle axis, the contact area, the surface of the cutting wheel, grinding circuit, the parameters of the contact zone*

**Постановка проблеми.** У машинобудуванні до 20% деталей мають плоскі поверхні значна частина яких потребують операцій шліфування [1]. Однією з ефективних схем обробки слід вважати шліфування торцем круга. Відомо, що шліфування торцем круга характеризується відносно великою величинами дуги контакту і поверхні взаємодії круга з деталлю, що обумовлює високі температури в зоні шліфування [2-4]. Тому площа контакту може бути прийнята у якості параметру для керування теплонпруженістю процесу шліфування. Одним з найбільш ефективних технологічних прийомів регулювання площі контакту РПК з деталлю є попередній нахил осі шпинделя верстата [5, 6]. Аналіз літературних джерел інформації показав, що дані, стосовно аналітичного визначення площі контакту торцевого круга з

деталлю в умовах попереднього нахилу осі шпинделя відсутні. А це не дозволяє технологю у повній мірі використовувати переваги такої схеми обробки. Таким чином, питання, пов'язане з теоретичним встановленням площі контакту різальної поверхні торцевих кругів з деталлю є актуальним.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

При плоскому торцевому шліфуванні часто користуються прийомом, коли шліфувальний круг на етапах попередньої та чистової обробки нахилиють на певний кут, а на етапі остаточного шліфування повертають у вихідне положення [2, 3]. При цьому можливі три характерні випадки контакту різальної поверхні круга (РПК) з оброблювальною деталлю У першому випадку, коли значення кута  $\alpha$  достатньо велике (від десятка хвилин до декілька градусів), у контакт з поверхнею деталі знаходиться тільки частина РПК (з одного його боку), при цьому сліди від зерен круга мають чітко виражений вигляд у формі дуг, які зрушені відносно один одного у напрямку поздовжньої подачі (рис. 1, а). У другому випадку, коли кут  $\alpha$  має невеликі значення (близькі до нуля), в контакт з поверхнею деталі вступає протилежна частина РПК. При цьому сліди від зерен круга також мають чітко виражений вигляд у формі дуг, які зрушені відносно один одного у напрямку поздовжньої подачі, але дуги, утворені лівою частиною круга, мають протилежний напрям (рис. 1, б) і перетинаються з дугами, утвореними правою частиною. У третьому випадку маємо класичний варіант, коли кут  $\alpha$  дорівнює нулю і в контакт з поверхнею деталі бере участь вся РПК. Звісно, що у першому та другому випадках позитивним моментом є можливість управління площею зони контакту РПК з оброблювальною поверхнею, а отже і термосиловою напруженістю процесу шліфування [2, 7]. Але при цьому неминуче підвищення відхилення форми поверхні деталі (у даному випадку має місце її окремих випадок – увігнутість). Тому величину кута  $\alpha$  треба зменшувати на етапі чистового шліфування і при прецизійному шліфуванні приймати рівною нулю. Це стає можливим тому, що при чистових і остаточних операціях шліфування використовуються достатньо ошадливі режими різання у наслідок чого вірогідність негативного впливу температурного фактору значно зменшується. Особливості формування плоских поверхонь при застосуванні схем обробки «на прохід» та в умовах багатопрохідного шліфування детально розглянуто у роботах [5] та [6]. Вони отримані шляхом комп'ютерного геометричного моделювання. Але не зважаючи на це існує необхідність в аналітичних залежностях, які відображали б зв'язок площі контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами шліфування.

### **Мета дослідження**

Метою представленої роботи є встановлення аналітичних залежностей, які відображають зв'язок площі контакту різальної поверхні круга з деталлю з умовами плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі обертання шпинделя.

### **Основні матеріали досліджень**

Площа контакту РПК з деталлю залежить від ряду факторів [5], [6]. До них в першу чергу треба віднести кут нахилу  $\alpha$ , діаметр круга  $d_k$  і глибину обробки  $t$  які визначають такі лінійні параметри зони контакту РПК з деталлю як довжина  $W'$  та ширина  $B'$  (рис. 1).

При певних умовах, як обмежувальний фактор, можуть виступати, наприклад, ширина РПК, ширина деталі та схема обробки (симетрична, несиметрична).

Для визначення площі контакту РПК з деталлю приймемо допущення, що довжина контакту не перевищує ширину РПК, тобто  $W' \leq W$ , а  $d_{\min} \leq B \leq d_k$ . В цьому випадку зона контакту уявляє собою частину круга, обмежену дугою  $FN$  і хордою  $FN$ , тобто сегмент. Як видно з рисунка 1, хорда  $FN = B'$ , а дуга  $FN = L$ .

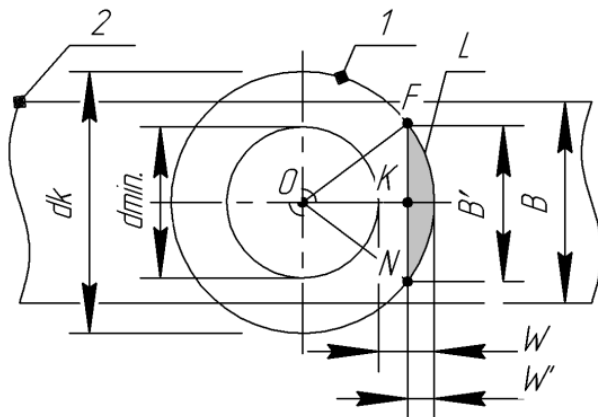


Рисунок 1 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $d_{\min} \leq B \leq d_k$ ,  $B' < B$ , а  $W' \leq W$

Існують декілька способів визначення площі сегменту [7]. Скористаємося тим з них, який заснований на використанні даних, що були отримані нами раніше [8].

Це ширина  $B'$  ( $B$ ), довжина  $W'$  та довжина дуги  $L$  ( $L_{\Delta}$ ) зони контакту РПК з деталлю.

Розглядаючи площу сегменту  $S_{\text{сегм.}}$  як частину площі сектора запишемо [7]:

$$S_{\text{сегм.}} = S_{\text{сект.}} - S_{\text{трик.}},$$

де  $S_{\text{сект.}}$  - площа сектора  $OFN$ ;  $S_{\text{трик.}}$  - площа трикутника  $OFN$ .

Тоді на заставі рис. 1 маємо, що:

$$S_{\text{сегм.}} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \frac{d_k}{2} - \frac{1}{2} \cdot FN \cdot OK.$$

Або після перетворень:

$$S_{\text{сегм.}} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L \cdot \frac{d_k}{2} - B' \cdot \left( \frac{d_k}{2} - W' \right) \right]. \quad (1)$$

Параметри  $W'$ ,  $B'$  та  $L$ , які входять до рівняння (1), розраховуються за виразами наведеними в [8].

Схема, представлена на рис. 1, справедлива як для випадку багатопрохідного шліфування, так і шліфування «на прохід» коли по мірі збільшення числа проходів (при здійсненні вертикальної подачі) зберігається умова, що  $B' < B$ . Але при цьому треба враховувати, що з моменту, коли круг повністю захоплює поверхню деталі по ширині (рис. 2),  $B' = B$ , а  $L = L_{\Delta}$  (див. залежність (1)).

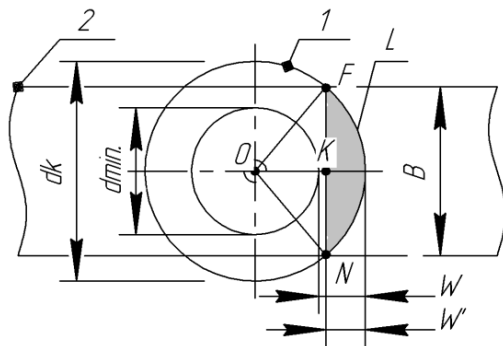


Рисунок 2 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при  $B' = B$



У випадку, коли  $W \leq W' \leq (d_k - W)$ , РПК може зазнати суттєвих змін. Справа в тому, що внутрішня кромка круга перестає бути захищеною і на ній буде утворюватися забірний конус розмір якого буде залежати з одного боку від умов обробки, а з другого від частоти правки РПК, наприклад, алмазним олівцем. Зона контакту буде мати більш складний вид. Наприклад, на рис. 3 показано проміжний варіант, коли  $W' = \frac{d_k}{2}$ , а  $d_{\min} \leq B < d_k$ .

З рис. 3 площу контакту можна визначити як:

$$S_{\text{зк.}} = S_{\text{кіл.}} - S_{\text{сегм.}}$$

Площа зони контакту  $S_{\text{зк.}}$  (затемнена) буде дорівнювати половині площі кільця ( $S_{\text{кіл.}}$ ) за винятком площі двох напівсегментів (заштриховано), тобто одного повного сегмента ( $S_{\text{сегм.}}$ ), який окреслений дугою  $\overset{\frown}{AB}$  та хордою  $AB$ .

Тоді можна записати, що:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} (d_k^2 - d_{\min}^2) - S_{\text{сегм.}} \tag{2}$$

Як було показано раніше (див. формулу (1)), для визначення площі сегменту треба знати довжини дуги  $L_{\text{сегм.}}$ , та хорди  $AF$ .

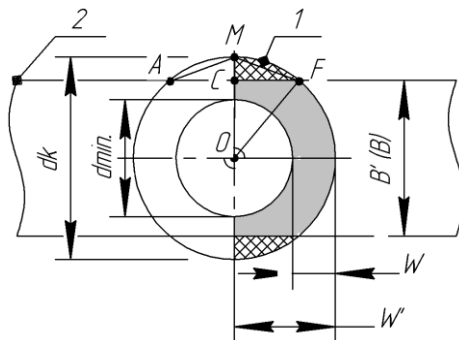


Рисунок 3 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $d_{\min} \leq B (B') < d_k$

На заставі рис. 2 маємо наступне вираження формули Гюйгенса для визначення  $L_{\text{сегм.}}$ .

$$L_{\text{сегм.}} = A\bar{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF). \quad (3)$$

Для визначення довжини дуги сегменту треба знати відрізки  $AM$  та  $AF$ . З прямокутного трикутника  $AMC$  маємо, що:

$$AM = \sqrt{AC^2 + MC^2}. \quad (4)$$

Відрізок  $MC$  можна визначити як:

$$MC = \frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}. \quad (5)$$

Скористаємося канонічним рівнянням окружності:

$$X^2 + Y^2 = R^2.$$

В нашому випадку координати точки  $F$  дорівнюють:

$$X = AC = \frac{AF}{2}; Y = \frac{B}{2}; R = \frac{d_k}{2}.$$

Тоді канонічне рівняння окружності можна записати як:

$$X^2 + \frac{B^2}{4} = \frac{d_k^2}{4}.$$

Звідси:

$$X^2 = \frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4},$$

Або:

$$AC = CF = X = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}. \quad (6)$$

Після підстановки рівнянь (5) та (6) в формулу (4) маємо, що

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_k}{2} - \frac{B}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \frac{d_k^2}{4} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B + \frac{B^2}{4}}.$$

Розкриваючи рівняння маємо, що:

$$AM = \sqrt{\frac{d_k^2}{2} - \frac{1}{2} \cdot d_k \cdot B} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)}.$$

Тоді на основі (3) можна записати, що довжина дуги сегменту буде дорівнювати:

$$L_{\text{сегм.}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - 2 \cdot X).$$

Або:

$$L_{\text{сегм.}} = \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} + \frac{1}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}).$$

В кінцевому стані маємо, що:

$$L_{\text{сегм.}} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot d_k \cdot (d_k - B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)}.$$

Тоді вираз (2) прийме вид:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot X \cdot B \right].$$

Або:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right].$$

Кінцевий стан цього рівняння має вигляд:

$$S_{\text{зк.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{\text{сегм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (7)$$

Треба мати на увазі, що формула (7) справедлива тільки для випадку, коли  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $d_{\text{мін.}} \leq B (B') < d_k$ .

У разі, коли ширина деталі менша за внутрішній діаметр круга, в сегменті з дугою  $K\bar{L} = L_{\text{сегм.}}$ , знаходиться «пустий» сегмент (рис. 4, заштриховано) з дугою  $A\bar{F} = L_{n.\text{сегм.}}$ . Тому в рівнянні (7) треба враховувати

площу «пустого» сегмента, яка визначається за рівнянням (1). Для її визначення треба знайти довжину дуги цього пустого сегменту:

$$L_{\text{п.сегм.}} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

З трикутника  $AOC$  маємо, що:

$$AM^2 = AC^2 + MC^2.$$

$$AC^2 = AO^2 - OC^2.$$

З рис. 4 витікає, що:

$$AO = \frac{d_{\text{min.}}}{2}; \quad OC = \frac{B}{2}; \quad MC = MO - CO = \frac{d_{\text{min.}}}{2} - \frac{B}{2}.$$

Відрізок  $AC$  можна визначити як:

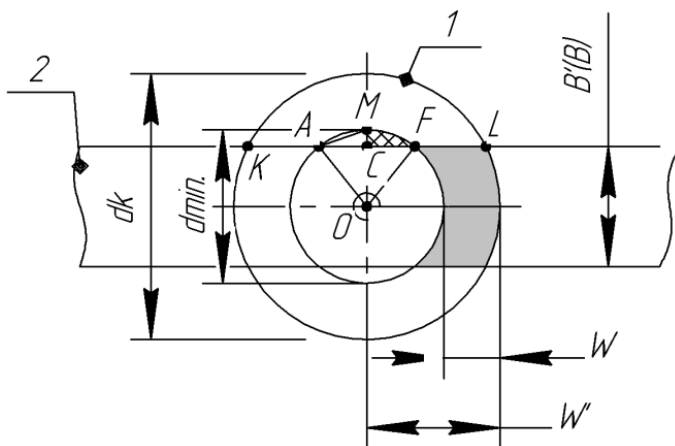


Рисунок 4 – Розрахункова схема для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що  $W' = 0,5 \cdot d_k$ , а  $B (B') < d_{\text{min}}$

$$AC^2 = \frac{d_{\text{min.}}^2}{4} - \frac{B^2}{4} = \frac{1}{4} \cdot (d_{\text{min.}}^2 - B^2).$$

Звідси:

$$AC = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)}.$$

Тоді можна записати, що:

$$AM^2 = \frac{d_{\min.}^2}{4} - \frac{B^2}{4} + \left(\frac{d_{\min.}}{2} - \frac{B}{2}\right)^2.$$

Розкриваючи останнє рівняння маємо:

$$AM = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (d_{\min.}^2 - d_{\min.} \cdot B)}.$$

Визначаємо довжину дуги при умові, що  $AF = 2 \cdot AC$ :

$$L_{n.сегм.} = A\check{F} = 2 \cdot AM + \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot AM - AF).$$

$$L_{n.сегм.} = \sqrt{2 \cdot (d_{\min.}^2 - d_{\min.} \cdot B)} + \frac{1}{3} \cdot (\sqrt{2 \cdot (d_{\min.}^2 - d_{\min.} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)}).$$

В кінцевому стані можна записати, що:

$$L_{n.сегм.} = \frac{4}{3} \cdot \sqrt{2 \cdot (d_{\min.}^2 - d_{\min.} \cdot B)} - \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)}. \quad (8)$$

Тоді площа «пустого» сегменту буде дорівнювати:

$$S_{n.сегм.} = \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{n.сегм.} \cdot \frac{d_{\min.}}{2} - \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right]. \quad (9)$$

Тоді формула для визначення площі зони контакту РПК з деталлю буде мати вид:

$$S_{зк.} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min.}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{сегм.} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + S_{n.сегм.}.$$

Або з урахуванням (9) остаточно маємо:

$$S_{зк.} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\min.}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{сезм.} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot \left[ L_{н.сезм.} \cdot \frac{d_{\min.}}{2} - \sqrt{(d_{\min.}^2 - B^2)} \cdot \frac{B}{2} \right] \cdot K_{н.с.} \quad (10)$$

Незважаючи на те, що для визначення довжин дуг сегментів була використана наближена формула Гюйгенса, похибка визначення площі контакту РПК з деталлю на перевищує 5% навіть для рівняння (10), в якому вона зустрічається двічі. При малих значеннях ширини деталі рівняння може давати значні похибки. Але це не визиває особливих побоювань бо, по-перше, при обробці деталей з малою шириною площа не є великою, а, по-друге, такі деталі зазвичай оброблюються у пакетах і в цілому складають широкі деталі.

Таким чином, рівняння (10) є універсальним, тобто його можна використовувати для випадків, які наведено на рис. 3-4, з урахуванням того, що в першому разі  $K_{н.с.} = 0$ , а в другому  $K_{н.с.} = 1$ .

Якщо використовується схема обробки «на прохід», коли при незмінних значеннях  $t$  та  $\alpha$  довжина  $W' = const$ , а сам процес здійснюється без застосування поперечної подачі, площа  $S_{прох.}$  на кожному проході буде різною завдяки збільшенню ширини  $B'$  та довжини дуги  $L$  зони контакту. Для визначення  $S_{прох.}$  треба оперувати поняттям сумарної глини обробки на проходах, або величиною увігнутості  $\Delta_i$  (рис. 5 – 6). В цьому випадку розраховують площі по одній з наведених вище формул припускаючи, що глибина на кожному проході є величиною сумарною і дорівнює відповідному значенню увігнутості.

На першому проході площа розраховується як звичайно (як при багатопрохідній обробці), а для подальших проходів як різницю між сумарною площею на даному проході і сумарною площею попереднього проходу:

$$S_{прох.i} = S_{прох.i} / t_{\Sigma i} = \Delta_i / - S_{прох.i-1} / t_{\Sigma i-1} = \Delta_{i-1} / \quad (11)$$

Стосовно рис. 5 та рис. 6 можна записати, що  $S_{прох.1} = S_{\Delta 1}$ ;  $S_{прох.2} = S_{\Delta 2} - S_{\Delta 1}$ ;  $S_{прох.3} = S_{\Delta 3} - S_{\Delta 2}$  і т.д.

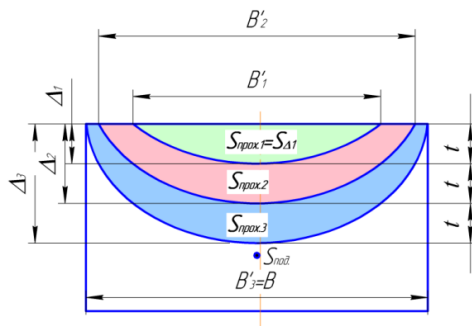


Рисунок 5 – Схема для визначення площі контакту РПК з деталлю при шліфуванні «на прохід» ( $t = \text{const}$  та  $W' = \text{const}$ )

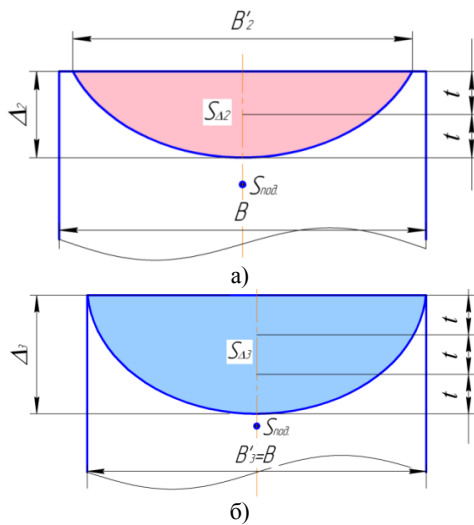


Рисунок 6 – До особливостей визначення площі контакту РПК з деталлю при шліфуванні «на прохід»

Наприклад, якщо весь припуск знімається за три проходи, а для розрахунку площі справедлива залежність (1), то при розрахунках параметрів  $B'$  та  $L$  [8] для першого проходу використовуємо глибину  $t = \Delta_1$ , для другого  $2 \cdot t = \Delta_2$  (рис. 6 а), третього  $3 \cdot t = \Delta_3$  (рис. 6 б) і т.д. Треба мати на увазі, що при розрахунку параметру  $W'$  [8] глибина обробки постійна і дорівнює  $t = \Delta_1$ . В цьому і полягає сенс обмеження площі контакту РПК з деталлю.

## **Висновки та перспективи розвитку**

Таким чином, аналіз глибинної схеми торцевого шліфування «на прохід» (з нахилом осі шпинделя) показав, що в разі обробки широких деталей площа контакту РІК з оброблюваною поверхнею може мати достатньо великі значення, особливо при використанні кругів із суцільним робочим шаром. Тому керування значенням площі за рахунок попереднього нахилу осі обертання шпинделя може забезпечити основні передумови для розширення технологічних можливостей процесу плоского торцевого шліфування.

**Список використаних джерел:** 1. *Маталін А. А.* Технология машиностроения / *А. А. Маталін* - Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 2. *Лурье Г. Б.* Шлифовальные станки и их наладка / *Г. Б. Лурье., В. Н. Комиссаржевская.* – М.: Высшая школа, 1972. – 416с. 3. Справочник технолога машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. *А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова.* – 5-е изд., исправл. – М.: Машиностроение-1, 2003.–912 с. 4. *Антонюк В. С.* Теплові явища при обробці різанням: Навч. посібник / *В. С. Антонюк, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко.* – К.: НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с. 5. *Пижов І. М.* Деякі особливості багатопрохідного плоского торцевого шліфування / *І. М. Пижов, В. Г. Клименко* // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2014.- Вып. 84.-С. 201-210. 6. *Пижов І. М.* Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / *І. М. Пижов, В. Г. Клименко* // Журнал інженерних наук : наук. журн. / Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 2. №2. – 2015. – С. А1-А6.- ISSN 2312-2498. 7. Формулы, интерактивный справочник по математике, геометрии, физике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fxyz.ru/>. 8. *Пижов І. М.* Теоретичні дослідження лінійних параметрів зони контакту різальної поверхні круга із деталлю та увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя Журнал інженерних наук : наук. журн. / *І. М. Пижов, В. Г. Клименко* // Сум. держ. ун-т. – Суми: Вид-во СумДУ. Том 3. № 1. -2016. - С. А9-А14.- ISSN 2312-2498.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Matalin A. A.* Tehnologija mashinostroenija / *A. A. Matalin* – L.: Mashinostroenie, 1985. – 496 s. 2. *Lur'e G. B.* Shlifoval'nye stanki i ih naladka / *G. B. Lur'e., V.N. Komissarzhevskaja.* – M.: Vysshaja shkola, 1972. – 416s. 3. Spravochnik tehnologa mashinostroitelja. V 2-h t. T.1 / Pod red. *A.M. Dal'skogo, A.G. Kosilovoj, R.K. Meshherjakova, A.G. Suslova.* – 5-e izd., ispravl. – M.: Mashinostroenie-1, 2003.–912 s. 4. *Antonjuk V.S.* Teplovi javishha pri obrobci rizannjam: Navch. posibnik / *V.S. Antonjuk, S.An. Klimenko, S.A. Klimenko.* – K.: NTU Ukraini «KPI», 2014. – 156 s. 5. *Pizhov I.M.* Dejaki osoblivosti bagatoprophidnogo ploskogo torcevoogo shlifuvannja / *I.M. Pizhov, V.G. Klimenko* // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah: Mezhdunar. nauch.-tehn. sb. – Har'kov: 2014.- Vyp. 84.-S. 201-210. 6. *Pizhov I.M.* Doslidzhennja ploshhi kontaktu rizal'noi poverhni krugu z detallju pri ploskomu torcevoemu shlifuvanni z poperednim nahilom osi shpindelja / *I.M. Pizhov, V.G. Klimenko* // Zhurnal inzhenernyh nauk : nauk. zhurn. / Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 2. №2. – 2015. – S. A1-A6. – ISSN 2312-2498. 7. Formuly, interaktivnyj spravochnik po matematike, geometrii, fizike [Jelektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.fxyz.ru/>. 8. *Pizhov I.M.* Teoretichni doslidzhennja liniynih parametrov zoni kontaktu rizal'noi poverhni kruga iz detalju ta uvignutosti pri ploskomu torcevoemu shlifuvanni z nahilom osi shpindelja Zhurnal inzhenernyh nauk: nauk. zhurn. / *I.M. Pizhov, V.G. Klimenko* // Sum. derzh. un-t. – Sumi: Vid-vo SumDU. Tom 3. № 1. – 2016. – S. A9-A14. – ISSN 2312-2498.



И. А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СВОБОДНЫМ И СВЯЗАННЫМ АБРАЗИВОМ**

*Получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемой шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с обработкой свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно разновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости.*

**Ключевые слова:** обработка свободным абразивом, шлифование, шероховатость поверхности, разновысотное расположение зерен, зернистость круга, режим резания

*Отримано аналітичні залежності для визначення шорсткості поверхні при обробці вільним і зв'язаним абразивом з позиції теорії ймовірностей спрощеним методом розрахунку. Показано, що різновисотне розташування зерен на робочій поверхні круга суттєво обмежує можливості досягнення необхідної шорсткості поверхні при шліфуванні порівняно з обробкою вільним абразивом. Основними умовами зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні є зменшення зернистості круга, створення на кругі приблизно разновисотного розташування зерен, наклеювання на робочу поверхню круга шару абразивного порошку невеликої зернистості.*

**Ключові слова:** обробка вільним абразивом, шліфування, шорсткість поверхні, разновисотне розташування зерен, зернистість круга, режим різання

*Analytical dependence for determining the surface roughness of the processing of free and bound abrasive with the position of the theory of probability a simplified method of calculation. It is shown that the location of different height grains on the working surface of a circle substantially limits the ability to achieve the required surface roughness when grinding as compared to treatment with free abrasive. The main terms of reducing the surface roughness is a reduction in grinding grain circle, creating the circle around the location odnovysotnogo grains sticking to the working surface of the circle a little abrasive powder grain layer.*

**Keywords:** free abrasive machining, grinding, surface roughness, odnovysotnoe location grains, grain range, cutting mode

**Постановка проблемы.** Обеспечение высококачественной обработки деталей машин является важнейшим условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Как известно, параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей деталей формируются на финишных операциях абразивной обработки, осуществляемых методами обработки свободным и связанным абразивом. Наибольшими технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества обработки располагает обработка свободным абразивом. Поэтому

операціям обробки вільним абразивом (доводка, поліруванню і т.д.) завжди передують операції обробки зв'язаним абразивом (шліфування, хонінгування, суперфінішування і т.д.), оскільки лише на цих операціях можна досягти високих показателів якості обробки, наприклад, шорхуватість поверхні на рівні  $R_a \leq 0,05$  мкм. Разом з тим, операції обробки вільним абразивом характеризуються найбільшою трудомісткістю, зменшити яку можна головним чином шляхом переходу на обробку зв'язаним абразивом. Однак для цього необхідно забезпечити такі ж показателі якості обробки, як і при обробці вільним абразивом. В деяких випадках це вдається, наприклад, досягти при шліфуванні шорхуватість поверхні на рівні  $R_a = 0,05-0,1$  мкм і виключити з технологічного процесу обробку вільним абразивом, що різко знижує трудомісткість обробки. Однак в більшості випадків шліфування гарантовано не забезпечує таких високих показателів якості обробки, тому доводиться застосовувати трудомістку обробку вільним абразивом. В зв'язі з цим, актуально рішення задачі з'ясування технологічних можливостей підвищення якості обробки при шліфуванні і в особливості зменшення шорхуватості поверхні до рівня  $R_a = 0,05$  мкм і менше.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням дослідження шорхуватості поверхні при абразивній обробці в науково-технічній літературі приділено велику увагу [1-4]. Розроблені ефективні технологічні процеси обробки вільним і зв'язаним абразивом і практичні рекомендації по їх застосуванню. Розроблені методи аналітичного визначення параметрів шорхуватості поверхні, що дозволяє науково обґрунтовано підійти до вибору оптимальних умов обробки, забезпечують необхідну шорхуватість поверхні. Їх застосування дозволяє вирішити актуальну задачу зменшення шорхуватості поверхні при шліфуванні до рівня, досяжного при обробці вільним абразивом, з метою зниження трудомісткості обробки. Тому в роботі вирішується задача аналізу технологічних можливостей обробки вільним і зв'язаним абразивом з точки зору зменшення шорхуватості поверхні при шліфуванні. В основу роботи покладені результати теоретичних досліджень шорхуватості поверхні, наведені в роботах [1-3].

**Мета роботи** – обґрунтування умов зменшення шорхуватості поверхні при шліфуванні до рівня, досяжного при обробці вільним абразивом, для зниження трудомісткості обробки.

**Основний матеріал.** В роботі [5] встановлено, що при одношаровому розташуванні абразивних зерен на робочій поверхні алмазно-

абразивного інструмента, т.е. при доводке, на оброблюваної поверхності в процесі різання утворюється шерохуватий шар, який математически може бути описан вероятностною функцією – відносительной опорной длиной мікропрофіля обробленої поверхності

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

де  $2\gamma$  – кут при вершині конусообразного режущого зерна;  $n$  – суммарне кількість абразивних зерен, учасуючих в формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності;  $B$  – ширина обробки, м;  $y$  – координата, відсчитується від вершини режущого зерна, м.

По фізической суті вероятностная функція  $\Phi(y)$  визначає частку неснятого матеріалу в шерохуватому шарі обробленої поверхності по координаті  $y$ . Як видно, з збільшенням  $y$  функція  $\Phi(y)$  зменшується і при умові  $y = R_{\max}$  приймає значення, близьке до нуля, де  $R_{\max}$  – максимальна висота мікронервностей обробленої поверхності (стандартний параметр шерохуватості поверхності), м.

При умові  $y=0$  функція  $\Phi(y=0)=1$ , т.е. на цьому рівні весь матеріал не снят абразивними зернами. При умові  $y = R_{\max}$  функція  $\Phi(y = R_{\max}) = \Phi_0$ , де  $\Phi_0$  може приймати значення, рівні 0,1; 0,05; 0,01 і менше, оскільки функція  $\Phi(y)$  є вероятностною і не може бути рівна нулю. Тоді, потенцірую залежність (1), з урахуванням  $y = R_{\max}$  і  $\Phi(y = R_{\max}) = \Phi_0$  отримано:

$$R_{\max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (2)$$

В залежності (2) функція  $\ln \Phi_0$  від'ємна, а параметр шерохуватості поверхності  $R_{\max}$  приймає позитивні значення.

Як видно, зменшити  $R_{\max}$  можна головним чином за рахунок збільшення суммарного кількості абразивних зерен, учасуючих в формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності  $n = k \cdot B \cdot l$ , де  $k$  – поверхнісна концентрація зерен на робочій поверхності круга, шт./м<sup>2</sup>;  $l$  – довжина робочої частини інструмента, учасуюча в формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності, м.

Після перетворення залежність (2) приймає вигляд:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot l}. \quad (3)$$

Исходя из зависимости (3), уменьшить  $R_{max}$  можно увеличением двух параметров –  $k$  и  $l$ .

В работе [5] также установлено, что в случае разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента (а это имеет место при шлифовании), вероятностная функция  $\Phi(y)$  описывается следующей зависимостью

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y^2}{B \cdot 2b}}, \quad (4)$$

где  $b$  – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки инструмента (шлифовального круга), м.

Потенцируя зависимость (4), с учетом  $y = R_{max}$  и  $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$  получено:

$$R_{max} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B \cdot b}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}}. \quad (5)$$

Как видно, зависимость (5) принципиально отличается от аналогичной зависимости (2). Это связано с наличием в ней параметра  $b$ , который может изменяться в широких пределах, вызывая увеличение параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$ .

Для количественной оценки значений параметра  $R_{max}$ , полученных при одновысотном и разновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, обозначим в зависимости (2) параметр  $R_{max} = R_{max1}$ , а в зависимости (5) –  $R_{max} = R_{max2}$ . Представляя

зависимость (2) в виде  $-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n} = 2 \cdot R_{max1}$ , и подставляя ее в зависимость (5), получено:

$$R_{max2} = \sqrt{2 \cdot R_{max1} \cdot b}. \quad (6)$$

В табл. 1 и на рис. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (6) значения  $R_{max2}$  для разных значений  $R_{max1}$  и  $b$ .

Таблиця 1 – Расчетные значения  $R_{max2}$  (в мкм)

$R_{max1}$ , мкм	0,05	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
$R_{max2}$ (для $b=2$ мкм)	0,447	0,632	1,414	2,0	2,5	2,828
$R_{max2}$ (для $b=5$ мкм)	0,707	1,0	2,236	3,162	3,878	4,472
$R_{max2}$ (для $b=10$ мкм)	1,0	1,414	3,162	4,472	5,477	6,328
$R_{max2}$ (для $b=20$ мкм)	1,141	2,0	4,472	6,325	7,746	8,944

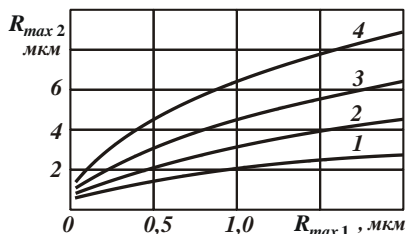


Рисунок 1 – Зависимость параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  от  $R_{max1}$  :  
 1 –  $b=2$  мкм; 2 –  $b=5$  мкм; 3 –  $b=10$  мкм; 4 –  $b=20$  мкм

Из табл. 1 следует, что параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  принимает значения, значительно превышающие значения  $R_{max1}$ . Этим объясняется то, что при шлифовании в связи с разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности шлифовального круга параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  принимает весьма большие значения, несоизмеримые со значениями  $R_{max1}$ , достигаемыми в процессе доводки (обработки свободным абразивом) при одних и тех же значениях параметров  $n$  и  $B$ . Поэтому основным путем уменьшения  $R_{max2}$  следует рассматривать уменьшение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, т.е. уменьшения параметра  $b \rightarrow 0$ . Это достигается созданием на рабочей поверхности круга плосковершинных зерен за счет их затупления алмазным правящим карандашом [6]. Обеспечить фактически одновысотное расположение зерен можно электрогальваническим осаждением абразивных или алмазных зерен на рабочую поверхность круга. Уменьшить параметр  $b$  можно также изготовлением абразивных или алмазных кругов из зерен одного размера и т.д.

Разновысотное участие абразивных зерен в резании может быть обусловлено как разновысотным расположением зерен на рабочей

поверхности инструмента, так и режимом обработки. Например, при одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента и в условиях доводки с радиальной подачей происходит разновысотное участие  $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$  абразивных зерен в резании, где  $V_{инстр}$  – скорость перемещения алмазно-абразивного инструмента, м/с;  $S$  – скорость радиальной подачи, м/с;  $\tau$  – время, в течение которого происходит радиальная подача на величину  $R_{max1}$ .

Подставляя параметр  $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$  в зависимость (2), получено

$$R_{max1} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot S}{2 \cdot tg \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}} . \quad (7)$$

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением  $S/V_{инстр}$ : чем оно больше, тем больше  $R_{max1}$ . Поэтому уменьшить  $R_{max1}$  можно уменьшением отношения  $S/V_{инстр}$  за счет уменьшения  $S$  или увеличения  $V_{инстр}$ .

Как видно, в процессе доводки имеет место разновысотное участие абразивных зерен в резании, что приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_{max1}$ . Основным условием уменьшения  $R_{max1}$  следует рассматривать осуществление процесса доводки без радиальной подачи за счет создания начального натяга в технологической системе и применения процесса выхаживания. Очевидно, осуществление доводки с радиальной подачей (по жесткой или упругой схемам) увеличивает параметр шероховатости поверхности  $R_{max1}$  в соответствии с зависимостью (7).

Сравнивая аналогичные зависимости (3) и (7), видно, что в случае разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности инструмента за счет увеличения параметра  $l$  при доводке проще добиться требуемой шероховатости поверхности, чем в случае разновысотного участия абразивных зерен в резании, где шероховатость поверхности определяется отношением  $S/V_{инстр}$ . Следовательно, применение радиальной подачи при доводке ограничивает возможности уменьшения шероховатости поверхности, т.е. доводку необходимо производить без радиальной подачи, например, реализуя упругую схему с заданным начальным натягом в технологической системе (схему выхаживания). Это позволит в максимальной степени использовать потенциальные возможности процесса доводки в плане достижения требуемой шероховатости поверхности.

К еще большему увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_{max2}$  приводит осуществление процесса шлифования с радиальной подачей. В этом случае количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности определяется зависимостью  $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot R_{max2} / V_{дет}$  (рис. 2), где  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – скорости круга и детали, м/с. Подставляя это выражение в зависимость (5), имеем

$$R_{max2} = \sqrt{\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot R_{max2}}} \quad (8)$$

Откуда

$$R_{max2} = \sqrt[3]{\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{tg \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \quad (9)$$

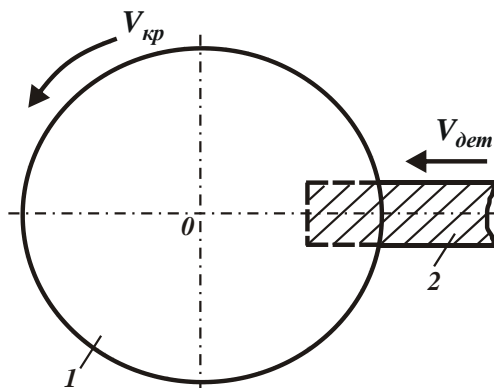


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса шлифования:  
1 – круг; 2 – деталь

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением  $V_{дет} / V_{кр}$ : чем оно больше, тем больше  $R_{max2}$ . Уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  можно, прежде всего, уменьшением радиальной подачи  $S$ . Наиболее просто это осуществить в условиях шлифования по упругой схеме с заданным радиальным усилием. Это обеспечивает минимальные значения  $S$  и соответственно минимальные значения параметра шероховатости поверхности  $R_{max2}$ .

С учетом известных соотношений [7]:  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ ;  $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$

зависимость (9) примет вид:

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{-\frac{200 \cdot \pi \cdot \ln \Phi_0 \cdot V_{дет}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (10)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен круга (для 100%-й концентрации алмазного круга –  $m=100$ );  $(1 - \varepsilon)$  – безразмерная величина, определяющая степень выступания режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Исходя из зависимости (10), уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  при шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга  $\bar{X}$ , а также за счет уменьшения  $V_{дет}$  и увеличения  $m$  и  $V_{кр}$ .

Как показывает практика, изготовление шлифовального круга с весьма малой зернистостью (например, алмазного круга зернистостью 5/3) вызывает значительные технические сложности. Поэтому и реализация значений параметра шероховатости поверхности на уровне  $R_{max} = 0,1$  мкм при шлифовании фактически невозможна. В этих условиях эффективно применение обработки свободным абразивом, о чем свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в табл. 1, согласно которым можно гарантированно обеспечить высокие показатели шероховатости поверхности. Основным условием применения процесса шлифования с целью уменьшения шероховатости поверхности следует рассматривать притупление вершин абразивных зерен и установление их примерно одновысотного выступания над уровнем связки круга. Учитывая то, что шлифование, как правило, осуществляется с поперечной подачей, параметр шероховатости поверхности  $R_{max2}$  в этом случае будет определяться зависимостью (7), которая в отличие от зависимости (9) приводит к меньшей шероховатости поверхности.

Таким образом, основным условием уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является снижение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга. Одним из эффективных решений в этом направлении следует рассматривать наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости или же увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью  $B \cdot l$  (например, при обработке отверстий), что позволит существенно увеличить количество одновременно работающих зерен  $n = k \cdot B \cdot l$ , участвующих в формировании шероховатости поверхности.



Необходимо отметить, что аналогичные зависимости для определения параметров шероховатости поверхности были получены в работе [3] другими методами расчета. Это указывает на их достоверность. Принимая значение  $\Phi_0=0,001$ , имеем  $\ln\Phi_0=-4,6$ . После подстановки этого значения в (10) получена зависимость

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{307 \cdot \pi \cdot V_{дет}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (11)$$

которая отличается от аналогичной зависимости, приведенной в работе [3], лишь множителем, равным 1,13. Следовательно, предложенный в настоящей работе подход к определению параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  позволяет существенно упростить расчеты и получить зависимости, аналогичные известным зависимостям, что открывает новые возможности анализа и оптимизации условий абразивной обработки по критерию наименьшей шероховатости поверхности.

Полученные теоретические решения использованы при разработке эффективных финишных операций абразивной обработки. Установлено, что применение мелкозернистых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет в ряде случаев уменьшить шероховатость поверхности до уровня  $R_a=0,05$  мкм и произвести замену трудоемкой обработки свободным абразивом.

**Выводы.** В работе получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Теоретически показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемых показателей шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с процессами обработки свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости, увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании за счет регулирования параметрами режима резания фактически невозможно в связи с ограниченностью пределов их изменения. Большими возможностями в этом плане располагает применение схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, т.е. схема выхаживания. Показано, что при обработке свободным абразивом с поперечной подачей эффективно

использовать упругую схему с фиксированной поперечной подачей, которая обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности.

**Список использованных источников:** 1. *Королев А.В.* Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / *А.В. Королев, Ю.К. Новоселов.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с. 2. *Евсеев Д. Г.* Физические основы процесса шлифования / *Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с. 3. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков.* – Одесса, 1995. – 36 с. 4. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / *Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Ченовецкий.* – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 5. *Новиков Ф.В.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности / *Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 44. – С. 140-149. 6. *Дитиненко С.А.* Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / *С.А. Дитиненко.* – Харьков, 2005. – 20 с. 7. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Korolev A.V.* Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki / *A.V. Korolev, Y.K. Novoselov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. – 320 s. 2. *Evseev D.G.* Fizicheskie osnovy protsessa shlifovaniya / *D.G. Evseev, A.I. Salnikov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. – 128 s. 3. *Novikov F.V.* Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 “Protssessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / *F.V. Novikov.* – Odessa, 1995. – 36 s. 4. Kathestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / *E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Thepovetskiy.* – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 s. 5. *Novikov F.V.* Issledovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnosti / *F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KPI”. – Kharkov: NTU “KPI”, 2004. – № 44. – S. 140-149. 6. *Ditinenko S.A.* Povyshenie effektivnosti tekhnologiyi finishnoy obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostey tverdospлавnykh izdeliy: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya” / *S.A. Diitinenko.* – Kharkov, 2005. – 20 s. 7. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravothnik / Pod red. prof. *A.N. Reznikova.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s.

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, д-р техн. наук., Н.В. Ступницька, канд. техн. наук,  
Львів, Україна

## **МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЕКТУВАННЯ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА**

*В статті наведені принципи, переваги та особливості концепцій об'єктно-орієнтованого та функціонально-орієнтованого технологічного проектування виробничих процесів машинобудування. Для реалізації паралельного інжинірингу, впровадження PLM-технологій запропоновано використання системи реологічного імітаційного моделювання процесів формоутворення деталей (CAF-системи). Це дасть можливість прогнозування основних кваліметричних експлуатаційних властивостей виробу вже на стадії технологічної підготовки машинобудівного виробництва.*

**Ключові слова:** об'єктно-орієнтоване проектування, функціонально-орієнтоване проектування, виробничі процеси

*В статье приведены принципы, преимущества и особенности концепций объектно-ориентированного и функционально-ориентированного технологического проектирования производственных процессов машиностроения. Для реализации параллельного инжиниринга, внедрения PLM-технологий предложено использование системы реологического имитационного моделирования процессов формообразования деталей (CAF-системы). Это даст возможность прогнозирования основных кваліметрических эксплуатационных свойств изделия уже на стадии технологической подготовки машиностроительного производства*

**Ключевые слова:** объектно-ориентированное проектирование, функционально-ориентированное проектирование, производственные процессы

*The article presents the principles, advantages and disadvantages of the object-oriented and functional-oriented process concepts in designing industrial processes engineering. For implementation of the concurrent engineering, PLM-technologies proposed use of rheological simulation of cutting process (CAF-system). It will make possibility to key performance properties qualimetric product at the stage of functional process design parameters of the structure and operations processing machine products manufacturing.*

**Keywords:** object-oriented designing, functional-oriented designing, industrial processes

Ефективна реалізація етапу технологічної підготовки виробництва є найбільш складним, трудомістким і багатоваріантним завданням в системі забезпечення життєвого циклу виробів. У традиційних інтегрованих системах автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва використовується класичний алгоритм технологічного проектування, що передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів безітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу. Тобто, спочатку на основі вхідних даних (як результат роботи CAD і CAE-систем:

макрогеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) засобами формальної ревалентності формується маршрут механічного оброблення виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими оброблення (CAPP-система), а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент, складається програма для верстатів з ЧПК (CAM-система). Таке проектування в класифікаційному контексті забезпечення поставленої мети можна вважати об'єктно-орієнтованим [1,2,3]. При цьому технолог (або автоматизована технологічна система) повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва, справедливо вважаючи, що призначення вихідних даних та граничних умов для технологічного проектування (в класичному сенсі - норм точності та якості окремих поверхонь виробу) – це прерогатива конструктора (або автоматизованої CAD/CAE системи) [4]. Проте, копіювання класичного алгоритму прийняття технологічних рішень істотно обмежує потенціал інтегрованої автоматизованої системи підготовки виробництва, не дає можливості комплексної реалізації системи PLM (*Product Life Management*). Очевидно, що в умовах реальної інженерної практики прогнозування функціональних особливостей виробу і пов'язане з ним призначення норм точності і якості окремих поверхонь виконується конструктором апріорно. Проте, навіть досвідчені конструктори не в змозі системно оцінити вплив таких важливих чинників, як мікротопологія поверхонь, залишкові напруження і деформації поверхневого шару на показники зносостійкості, втомну міцність, мастилоутримуючі і антикорозійні властивості поверхонь і т.п.!

*Об'єктно-орієнтоване проектування* - проектування складної системи як сукупності об'єктів, що взаємодіють один з одним, кожен з яких - екземпляр певного класу, з використанням принципів абстрагування, модульності, ієрархічності та спадковості властивостей. Комплекс робіт, пов'язаний з технологічним проектуванням нових виробів, включає в себе послідовність робіт по проектуванню, складанню, підготовки технічної документації, їх експериментально-дослідному випробуванню, аналізу експериментальних результатів з рекурентним повторенням циклу аж до отримання потрібного результату (табл.1). Тобто, спочатку виконується попередній проект технологічного процесу; на подальших стадіях його уточнюють і конкретизують на основі детальних технологічних розрахунків. Послідовним уточненням попереднього проекту отримують остаточний варіант технологічного процесу. Найбільш ефективно рішення вдається отримати тільки після розробки і порівняння декількох варіантів технологічних процесів. І основним критерієм такого проектування є забезпечення мінімальної

собівартості виробу за умови забезпечення формалізованих показників якості і заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції.

Об'єктивні умови розвитку ринкової економіки в сучасних умовах глобалізованого суспільства визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва продукції машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом всього життєвого циклу продукції [5]. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами, ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової (як результат підвищення якості та вдосконалення експлуатаційних та сервісних властивостей виробів) - підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів його життєвого циклу. Структурованість якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [6]. Таким чином, впровадження PLM вимагає проектування функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва, тобто врахування вже на стадії технологічної підготовки виробництва не тільки параметрів точності розмірів та шорсткості оброблюваних поверхонь, але й системного комплексу кваліметричних показників, що матимуть суттєвий вплив на забезпечення експлуатаційних, ремонтних, утилізаційних та інших функціональних властивостей виробів [6]. При реалізації функціонально-орієнтованої технологічної підготовки виробництва система не підміняє результати роботи конструктора, а лише доповнює їх такими важливими критеріями, як мікротопологія поверхневого шару, залишкові напруження та деформації тощо [7].

Протягом останніх років формується якісно новий науковий етап розвитку технології машинобудування, що полягає в об'єднанні технологій проектування, виготовлення і експлуатації машин і в розробці наукових основ по системному створенню нових технологічних методів обробки, в тому числі і механо-фізико-хімічних, що дозволяють забезпечити необхідні експлуатаційні властивості деталей машин. Запропонований у роботі [6] підхід у реалізації функціонально-орієнтованих технологій базується на багаторівневому проектуванні структури технології на кількох рівнях. Між окремими рівнями діють ітераційні та рекурентні зв'язки, що дозволяє синтезувати і коректувати структуру технологічного процесу на базі принципів комбінованих технологій; макро-, мікро- і нанотехнологій та функціонально-орієнтованих технологій. По суті це і є реалізацією принципу паралельного інжинірингу. Ітераційні і рекурентні зв'язки між окремими етапами проектування технологій дозволяють, по перше - послідовно виконувати синтез структури технологічного процесу на базі всіх етапів композиційних технологій, по-друге - виконувати повернення процесу проектування на попередні етапи, коректуючи розроблену раніше структуру і параметри технологічного процесу,

і по-третє – при синтезі технології обходити окремі етапи проектування як в прямому, так і в зворотному напрямках [5].

В роботі [6] наголошується, що процес врахування особливостей функціонально-орієнтованих технологій слід реалізувати на всіх етапах життєвого циклу виробу, а саме: аналізу виробу, конструкторського проектування, виготовлення, функціонування, модернізації та утилізації. Причому необхідно враховувати всі експлуатаційні особливості виробу в машині. Це і зосереджені контактні напруження, і нерівномірний розподіл питомих навантажень, залишкових напружень розтягу, стиску, згину, процесів зношування та втомної міцності елементів тощо.

В роботах [6, 7] сформульовані основні принципи створення функціонально-орієнтованих технологій, що базуються на таких положеннях:

1. У технології машинобудуванні кожен виріб прийнято розбивати на виконавчі поверхні, і технологічний процес проектувати, ґрунтуючись на визначеній послідовності забезпечення властивостей цих виконавчих поверхонь.

2. Між конструктивно-точнісними властивостями кожного функціонального елемента виробу, особливостями його експлуатації в машині і технологічними операціями та переходами їх оброблення існують певні зв'язки. Ці зв'язки в функціонально-орієнтованих технологіях необхідно встановити і формалізувати.

3. Реалізацію технологічних впливів на кожен функціональний елемент виробу необхідно виконувати з можливістю забезпечення зміни його властивостей у просторі і в часі залежно від особливостей експлуатації функціонального елемента виробу в машині або технологічній системі, а також залежно від заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу виробу в цілому.

Таким чином, зв'язок між функціональними властивостями виробу та технологією їх забезпечення повинен носити прогностичний характер. Очевидно, що експериментальні дослідження у випадку необхідності прийняття оперативного технологічного рішення є вкрай небажаними через значну трудомісткість та відсутність можливості диференційованого аналізу впливу окремих чинників на результат проектування. Наприклад, аналіз впливу геометрії різального інструменту, його коливань у всіх напрямках, деформаційні явища (в т.ч. залишкові) мають суттєвий вплив на мікротопографію поверхні. Проте проаналізувати їх вплив диференційовано можна лише використавши можливості комплексного імітаційного реологічного та аналітичного моделювання, а експериментальним шляхом можна лише підтвердити адекватність їх сукупного впливу на формування мікрогеометрії остаточно [9]. Таким чином, для інтегрованої системи автоматизованої підготовки машинобудівного виробництва можна використати 2 альтернативні концепції технологічного проектування - об'єктно-орієнтоване (ООТ) (табл. 1) та функціонально-орієнтоване проектування (ФОТ) (табл. 2).

Таблиця 1 – Загальна характеристика об'єктно-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принцип побудови критеріїв оптимізації структури і параметрів технологічного процесу	Переваги об'єктно-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми реалізації об'єктно-орієнтованого проектування
Макрогеометрична конфігурація деталі	Проектно-конструкторська документація, система САД, система MasterCAM	<b>Принцип побудови технологічного процесу:</b> Метод аналізу: алгоритмічний пошук структурного прототипу за конструкторсько-технологічними ознаками і корекція його параметрів у відповідності до вхідних даних на проектування	Адекватність формалізації вхідної інформації  Наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення	Неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації
Розмірно-вагові характеристики				
Точність геометричних розмірів				
Точність взаєморозташування поверхонь				
Фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі		<b>Критерії оптимізації:</b> забезпечення мінімального собівартості виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і заданих виробничо програмного об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва	Алгоритмічна простота технологічного проектування	Структурна жорсткість; відсутність ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи технологічної підготовки виробництва
Тип та організаційна форма виробництва	Організаційна та проектно-конструкторська документація, програма випуску продукції	Наявність значної кількості програмних продуктів, що реалізують принцип прототипування технологічних рішень (САРР та САМ системи)	Неповна відповідність концепції PLM проектування	Неможливість реалізувати принцип паралельного інжинірингу

Таблиця 2 – Загальна характеристика функціонально-орієнтованих технологій машинобудування

Вхідні дані для проектування	Джерела надходження вхідної інформації	Принцип побудови структури і параметрів технологічного процесу	Переваги функціонально-орієнтованого проектування	Недоліки та проблеми функціонально-орієнтованого проектування
Геометрична форма окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAD	Метод синтезу: алгоритмічний синтез оптимальної структури та параметрів окремих технологічних переходів, операцій, що базуються на прогностичних результатах імітаційного моделювання	Формалізація рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників	Складність врахування макрогометричних параметрів деталі для формування структури технологічного процесу  Необхідність структурної інтеграції та забезпечення єдиного формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/ /CAM системами
Специфікація матеріалу деталі (в т.ч. аналітичні залежності його дислокаційної кінетики, крива термо-деформаційного зміщення, критерії руйнування тощо)	Спеціалізована база даних			
Мікротопологія поверхневого шару окремої функціональної поверхні деталі	Проектно-конструкторська документація, система CAF, система CAPP, система CAE (в т.ч. MicroCAE, NanoCAE)	Повна відповідність концепції PLM	Забезпечення системної інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF /CAM) засобами паралельного інжинірингу	Відносна складність формалізації вхідних даних для проектування  Необхідність впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF – система)
Залишкові напруження (I, II і III роду)	Проектно-конструкторська документація, система CAF, система CAPP, система CAE (в т.ч. MicroCAE, NanoCAE)			
Напружено-деформований та термодинамічний стан заготовки в зоні стружкуутворення	МікроCAE, NanoCAE	Деформаційне та термодинамічне стану виробу в процесі його формоутворення	Необхідність сугучного вдосконалення існуючої CAE системи (MicroCAE, NanoCAE)	
Наклеп поверхневого шару окремої функціональної поверхні	МікроCAE, NanoCAE	Деформаційне та термодинамічне стану виробу в процесі його формоутворення	Необхідність сугучного вдосконалення існуючої CAE системи (MicroCAE, NanoCAE)	



Співставлення вищенаведених концепцій технологічного проектування, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Методологічні принципи побудови ООТ та ФОТ суттєво відрізняються. Так, основним критерієм при оптимізації структури і параметрів об'єктно-орієнтованого технологічного процесу є мінімальна собівартість виготовлення об'єкту виробництва при дотриманні формалізованих показників якості і забезпечення заданих виробничою програмою об'ємів виготовлення продукції, з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва. При виборі оптимального функціонально-орієнтованого технологічного процесу функцією мети є інтегральний кваліметричний показник, що системно характеризує комплекс експлуатаційних характеристик поверхонь виробу і отримується як результат формування в процесі формоутворення мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень і деформацій.

2. Основною перевагою ООТ є алгоритмічна простота технологічного проектування та наявність ґрунтовної теоретичної бази знань для прийняття оптимального технологічного рішення. Проте, така методологія не повністю відповідає концепції PLM (через неможливість врахування функціональних властивостей деталі в умовах її майбутньої експлуатації), та не допускає можливості реалізації принципу паралельного інжинірингу (внаслідок відсутності ітераційних та рекурентних зв'язків з іншими етапами інтегрованої системи підготовки виробництва).

3. Основною проблемою впровадження ФОТ є складність структурної інтеграції та забезпечення єдиного формату обміну даних між окремими CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM системами (CAPE технологія). Проте виконання цієї вимоги у будь-якому випадку декларується міжнародним стандартом ISO 10303. Перевагою даної методології є повне забезпечення вимог концепції PLM в частині формалізації рекурентних зв'язків між результатами технологічного проектування та умовами експлуатації виробу, що дає змогу забезпечити оптимальний комплекс його функціональних кваліметричних показників. Таким чином відбувається системна інтеграція автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва (CAD/CAE/CAPP/CAF/CAM) засобами паралельного інжинірингу.

4. Впровадження функціонально-орієнтованого технологічного проектування ставить проблему суттєвого вдосконалення існуючого комплексу CAD/CAE/CAPP/CAM програмних продуктів шляхом впровадження автоматизованої технологічної системи формоутворення виробу (CAF – системи) та модернізації існуючої CAE системи (розробка підсистем MicroCAE та NanoCAE).

5. Приймаючи до уваги позитивні та негативні особливості використання альтернативних концепцій технологічного проектування, можна рекомендувати застосування алгоритму вибору оптимальної структури

та параметрів технологічних процесів за концепцією функціонально-орієнтованого проектування тільки для деталей, які мають функціонально-важливі поверхні, що підлягають в процесі експлуатації підвищеним механічним, температурним, хімічним, триботехнічним навантаженням або їх поєднанням. Але саме такі деталі найчастіше забезпечують експлуатаційну якість виробу в цілому. Для виробів, які не відповідають цим умовам функціонування, доцільно використовувати алгоритм, що реалізує традиційну концепцію об'єктно-орієнтованого технологічного проектування. Проте, найбільш оптимальною методологією є комбінування альтернативних концепцій проектування, що полягає у попередньому пресинтезі структури і параметрів технологічного процесу з врахуванням макрогеометричних показників виробу (етап об'єктно-орієнтованого проектування) і наступній корекції цих технологічних параметрів, виходячи із змодельованих потенційних та критичних умов майбутньої експлуатації цього виробу (етап функціонально-орієнтованого проектування). Таким чином можна оптимізувати за критерієм складності процес технологічної підготовки виробництва, максимально використавши потенціал існуючих програмних продуктів АСТПВ, реалізуючи при цьому PLM-технологію.

**Список використаних джерел:** 1. *Ступницький В.В.* Проектування функціонально-орієнтованих технологій механічного оброблення деталей засобами паралельного інжинірингу / *В.В.Ступницький* // Вісник Донецького національного технічного університету «Прогресивні технології і системи машинобудування». - 2013.- Вип.1 (45). - 2 (46). - с. 249-256. 2. *Ступницький В.В.* Концептуальні особливості проектування об'єктно-орієнтованих і функціонально-орієнтованих технологій машинобудування / *В.В.Ступницький* // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века. - Том 3. - Донецьк.- 2013. - С.55-60. 3. *Ступницький В.В.* Структура та функції системи автоматизованої технологічної підготовки машинобудівного виробництва на основі концепції функціонально-орієнтованого проектування операцій / *В.В.Ступницький* // Міжнародний науковий журнал «Технологічні комплекси», Луцьк. - 2013.- №2(8). - С.65-71. 4. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <http://www.iso.org>. 5. *Кульга К.С.* Автоматизация технической подготовки и управления производством на основе PLM-системы / *К.С.Кульга*. - М.: Машиностроение, 2008. - 265 с. 6. *Гутыря С.С.* Системное моделирование качества механизмов и машин / *С.С.Гутыря* // Одесса: Труды Одесского политехнического университета.- 2003. - Вып. 2 (20). - С. 14-21. 7. *Михайлов А.Н.* Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / *А.Н.Михайлов*. - Донецк: ДонНТУ, 2009. - 346 с. 8. *Суслов А.Г.* Инженерия поверхности деталей / *А.Г.Суслов*. - М.: Машиностроение, 2008. - 320 с. 9. *Faassen R.P.H.* Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling/ *R.P.H.Faassen, N.Van de Wouw, J.A.J.Oosterling, H.Nijmeijer*. - Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture. - 2003.- №43. - pp.1437-1446. 10. *Валетов В.А.* Автоматизированная система непараметрической оценки микрогеометрии поверхности / *В.А.Валетов, Д.В.Васильков, А.В.Воронин* // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. научн. тр. - СПб.: СЗПИ, 1995. - С. 54- 67.103

**Bibliography (transliterated):** 1. *Stupnic'kij V.V.* Proektuvannja funkcional'no-orientovanih tehnologij mehanichnogo obroblennja detalej zasobami paralelnogo inzhiniringu / *V.V.Stupnic'kij* // Visnik Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu «Progresivni tehnologii i sistemi

mashinobuduvannya». – 2013. Vip.1 (45). – 2(46). – s. 249-256. **2.** *Stupnickij V.V.* Konceptual'nye osobennosti proektirovaniya ob'ektno-orientirovannyh i funkcional'no-orientirovannyh tehnologij mashinostroeniya / *V.V.Stupnickij* // Sbornik trudov XX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Mashinostroenie i tehnosfera XXI veka. – Tom 3. – Donec'k. – 2013. – S.55-60.

**3.** *Stupnic'kij V.V.* Struktura ta funkcii sistemi avtomatizovanoj tehnologichnoj pidgotovki mashinobudivnogo virobництва na osnovi koncepcii funkcional'no-orientovanogo proektuvannya operacij / *V.V.Stupnic'kij* // Mizhnarodnij naukovij zhurnal «Tehnologichni kompleksi», Luc'k. – 2013. – №2(8). – S.65-71. **4.** ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes. [Elektronnij resurs]: Rezhim dostupu: <http://www.iso.org>. **5.** *Kul'ga K.S.* Avtomatizacija tehnicheškoj podgotovki i upravlenija proizvodstvom na osnovе PLM-sistemy / *K.S.Kul'ga*. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 265 s. **6.** *Gutyryja S.S.* Sistemnoe modelirovanie kachestva mehanizmov i mashin / *S.S.Gutyryja* // Odessa: Trudy Odesskogo politehnicheskogo universiteta. – 2003. – Vyp. 2 (20). – S. 14-21.

**6.** *Mihajlov A.N.* Osnovy sinteza funkcional'no-orientirovannyh tehnologij / *A.N.Mihajlov*. – Donec'k: DonNTU, 2009. – 346 s. **7.** *Suslov A.G.* Inzhenerija poverhnosti detalej / *A.G.Suslov*. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s. **8.** *Faassen R.P.H.* Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling/ *R.P.H.Faassen, N.Van de Wouw, J.A.J.Oosterling, H.Nijmeijer*. Amsterdam: Elsevier // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003. – №43. – pp.1437-1446. **9.** *Valetov V.A.* Avtomatizirovannaja sistema neparametricheskoy ocenki mikrogeometrii poverhnosti / *V.A.Valetov, D.V.Vasil'kov, A.V.Voronin* // Mashinostroenie i avtomatizacija proizvodstva. Mezhvuz. sb. nauchn. tr. – SPb.: SZPI, 1995. – S. 54-67.103

УДК 621.833.65

В.М. Тігарєв, канд. техн. наук, В.М. Тонконогий, д-р техн. наук,  
О.О. Якімов, д-р техн. наук, Одеса, Україна

## **РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО МОДУЛЮ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ТРИВИМІРНОЮ МОДЕЛЛЮ РАМИ СПОРТИВНОГО АВТОМОБІЛЯ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ ПРОЕКТУВАННІ**

*Розробка програмного модулю для управління тривимірною моделлю рами спортивного автомобіля. Розглянуто технологію розробки програмного додатку для керування та аналізу просторової каркасно-векторної рами автомобіля за допомогою середовища iLogic САПР Autodesk Inventor Professional. Розроблено інтерфейс та необхідні правила побудови та управління моделлю. Проведено симуляцію фронтальних та бічних навантажень.*

**Ключові слова:** *тривимірна модель, правила побудови та управління моделлю*

*Разработка программного модуля для управления трёхмерной моделью рамы спортивного автомобиля. Рассмотрено технологию разработки программного приложения для управления и анализа пространственной каркасно-векторной рамы автомобиля с помощью среды iLogic САПР Autodesk Inventor Professional. Разработан интерфейс и необходимые правила построения и управления моделью. Проведена симуляция фронтальных и боковых нагрузок.*

**Ключевые слова:** *трёхмерная модель, правила построения и управления моделью*

*Development of the programming module to control three-dimensional model of sport car frame. This paper describes software applications development techniques to control and analyze three-dimensional vectorized car frame by means of the iLogic Computer-Aided Design System, namely, Autodesk Inventor Professional. The interface and required rules for designing and controlling model were developed. Simulation of frontal and side loads was carried out.*

**Keywords:** *three-dimensional model, rules for designing and controlling model*

### **Вступ**

Основною спортивного автомобіля є шасі. Призначення шасі полягає у включенні всіх чотирьох коліс у структуру з жорсткістю на згин та кручення, тобто таку, яка не буде ні прогинатися, ні викручуватися. Рамна конструкція шасі повинна бути здатна підтримувати всі компоненти і пасажирів, а також вбирати в себе всі подані на неї навантаження без надмірних відхилень.

### **Постановка завдання**

Рамні конструкції можливо проектувати у різних САД системах. Можливий варіант комп'ютерної моделі рами спортивного автомобіля представлено у [1]. Використання сучасних комп'ютерних технологій при проектуванні рами спортивного автомобіля дозволяє скоротити час, підвищить точність, створити параметричну комп'ютерну модель для проведення аналізу механічних навантажень, але у цій роботі не представлена

технологія створення програмного модулю керування тривимірної моделлю. Задачу зручніше вирішувати за допомогою САПР Autodesk Inventor Professional, яка дозволяє створити параметричну тривимірну модель просторової рами автомобіля в розділі «Проектування рам». Параметризація дозволяє провести аналіз створеної моделі для різноманітних профілів елементів конструкції. Для створення програмного додатку використовується середовище iLogic Autodesk Inventor

### **Результати дослідження**

Метою роботи є розгляд технології створення програмного модулю для керування тривимірною параметричною моделлю рами спортивного автомобіля та аналіз створеної моделі рами при проведенні симуляції фронтального та бокового впливів для різних модифікацій рами.

Одним з найважливіших завдань проектування рами має бути забезпечення безпеки водія, а вже потім її ефективність, як конструкції з'єднання основних вузлів авто. Але щоб бути ефективною з точки зору конструкції, рама повинна бути досить жорсткою, що також сприяє підвищенню рівня її безпеки. Тобто ці дві мети досягаються дещо схожими методами, різниця лише в місцях застосування. Для аналізу створеної моделі рами необхідно проведення симуляцію фронтального та бокового впливів для різних модифікацій рами.

При створенні моделі спортивного автомобіля необхідно виконати модель основи рами, а потім створити групи елементів, які дозволять зміцнити загальну надійність конструкції. Такий підхід дозволить провести поетапний аналіз конструкції на жорсткість та надійність.

Побудова просторової рами має деякі особливості порівняно зі звичними збірками, зібраними зі звичних змодельованих деталей. По-перше, для того щоб модель можна було тестувати в середовищі «Аналіз рам», вона повинна бути створена зі спеціальних профільних елементів. По-друге, для завдання стандартного профілю необхідний попередньо створений ескіз, введений в середовище збірки у якості компоненту (профіль задається лише в середовищі збірки). По-третє, для моделі необхідна наявність декількох підрівнів деталізації (збірки в збірках), що надасть певну свободу контролю над різними компонентами та рівнями деталізації.

Технологію створення тривимірної параметричної моделі рами розглянуто у роботі [1].

Вигляд основи рами має вигляд (Рис. 1). Кінцева параметрична тривимірна модель просторової рами з елементами жорсткості має вигляд (Рис. 2).

Для створення програмного додатку використовується середовище iLogic Autodesk Inventor. Додаток включає у себе правила керування моделлю та необхідний користувацький інтерфейс.

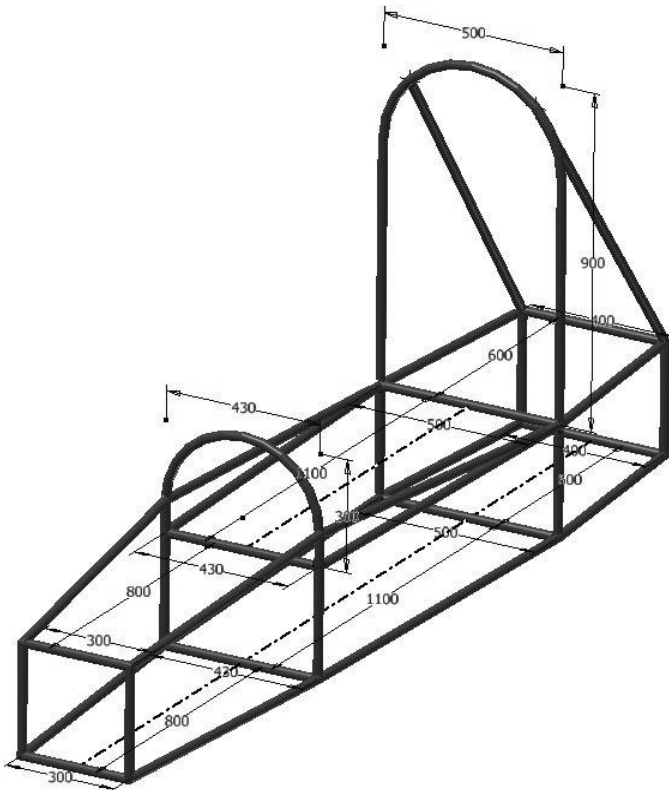


Рисунок 1

Оскільки функціонування додатку ґрунтується на параметрах моделі (як і власне, все в середовищі Autodesk Inventor), то перед тим, як безпосередньо приступити до компонування правил iLogic, ми створимо декілька користувацьких параметрів. Задля цього на цій же вкладці натиснемо на клавішу «Параметри».

У вікні, що з'явилося, можемо управляти існуючими параметрами, створювати нові і таке інше. Додавання нових параметрів проводиться натисканням клавіші, що знаходиться внизу зліва у вікні параметрів. Створимо сім нових параметрів (Рис. 3):

- «хрестовини» – текстовий;
- «хрестовини бічні» – текстовий;
- «матеріал» – текстовий;

- «бічні діагоналі» – текстовий;
- «маса» – цифровий;
- «перетин» – цифровий;
- «товщина» – цифровий.

Значення кожного з них буде налаштовано безпосередньо при описі коду, в якому він буде використовуватися.

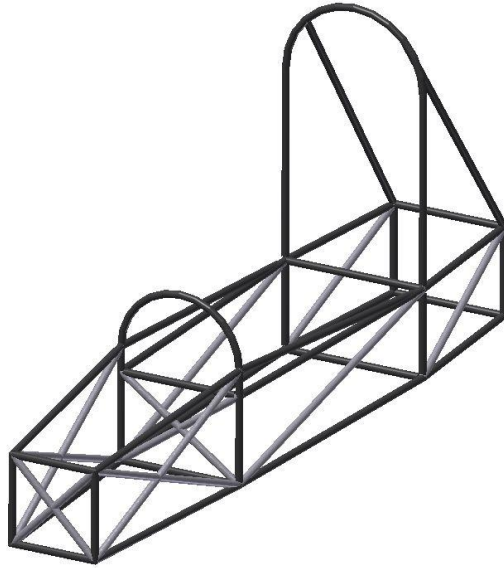


Рисунок 2

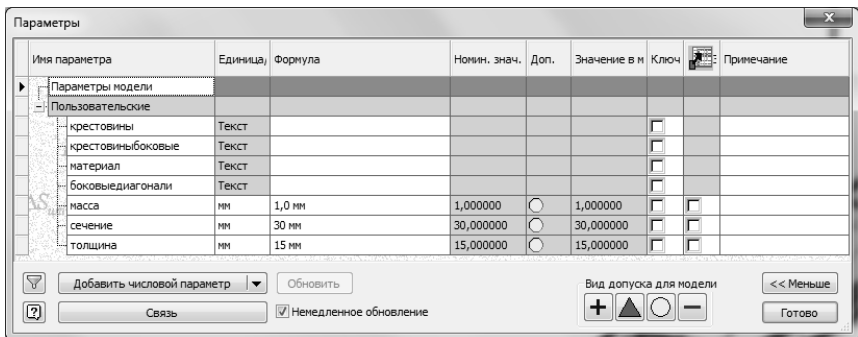


Рисунок 3

Наш програмний додаток по задуму повинен мати власний інтерфейс. Для цього він повинен функціонувати у власному вікні (формі). Створення форми відбувається в контекстному меню вкладки «Форми» браузера iLogic. Вибираємо пункт «Додавання форми». З'являється вікно налаштувань функціоналу форми та власне сама порожня форма. Міняємо її назву на «Налаштування варіацій рами» та погоджуємося зі створенням, натискаючи клавішу «ОК». Вікно редактора форм після створення вікна інтерфейсу має вигляд (Рис. 4).

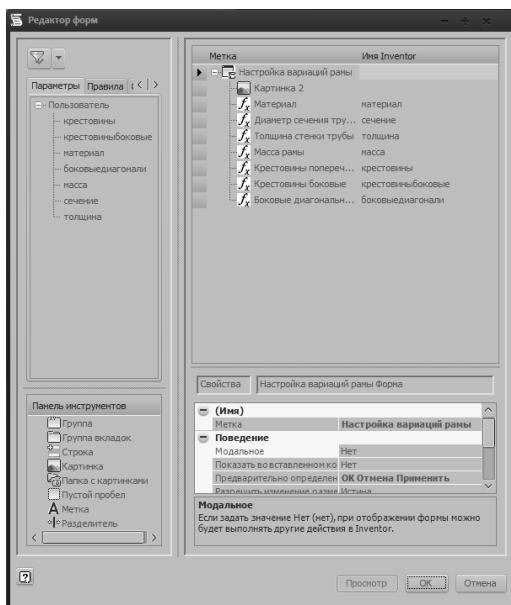


Рисунок 4

Тепер заповнимо форму. В діалоговому вікні редагування (відкривається через контекстне меню вкладки «Форми») виводяться для використання всі користувальні параметри, правила, властивості Inventor та стандартні інструменти створення форм (порожні текстові поля, групи вкладок, рисунки і таке інше). Всі наші елементи форми додані на форму за допомогою користувальних параметрів. В залежності від типу параметру вони по-різному відображаються на формі: параметри для присвоєння певного значення – у вигляді текстового поля, параметри з багатьма значеннями – у вигляді випадаючого списку. Для деяких параметрів можна змінити режим відображення, для параметру з двома значеннями доступний як режим випадаючого списку, так і режим радіокнопки, що й використано на формі.



Вікно інтерфейсу для керування побудовою рами та завдання необхідних параметрів має вигляд (Рис. 5)

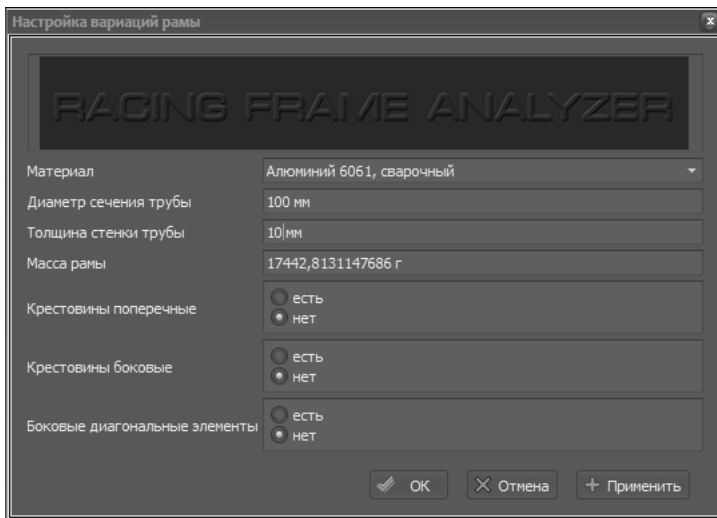


Рисунок 5

Перейдемо до створення коду елементів функціоналу форми. Натискаємо клавішу «Додати правило» на панелі інструментів iLogic. Перед нами відкривається середовище програмування iLogic. Задля коректної роботи додатку весь код буде знаходитися в одному правилі. Це пояснюється тим, що для виконання деяких функцій важливий порядок виконання інших.

Аналізуючи можливості нашого середовища та цілі проектування, ми наступним кроком зробимо на нашій формі радіо кнопку, по перемикачню якої будуть під'єднуватися або від'єднуватися поперечні хрестоподібні елементи рами. Суттю створення цієї функції є можливість швидкого доступу до різних комбінацій рами для проведення аналізу кожної з них.

В реалізації поставленої задачі нам допомогла функція iLogic – Component Is Active ("Part1:1") – функція, котра може подавити компонент збірки або повернути його назад в розрахунок. "Part1:1" – імя компоненту. Для її реалізації запишемо невеликий цикл «якщо ... то». В умовній частині оператора ми присвоюємо параметру «хрестовини» значення «ні». При виконанні цієї умови Component Is Active ("Part1:1") буде рівнятися значенню False, тобто компонент стане неактивним. В наступній умовній частині параметр «хрестовини» буде рівнятися значенню «так». При виконанні цієї умови Component Is Active ("Part1:1") буде дорівнювати True, тобто компонент стане знову активним.

Приклад коду:

```
If «хрестовини» = «ні» Then  
Component Is Active ("хрестовини:1") = False  
Else If «хрестовини» = «так» Then  
Component Is Active ("хрестовин:1") = True  
End If
```

Подібним чином ми створюємо радіокнопки для підключення / відключення двох інших інсталяцій, код буде аналогічним, різниця лише в назвах компонентів.

Наступною важливою функцією нашого додатку буде можливість зміни матеріалу. Її можна реалізувати за допомогою функції iLogic iProperties Matherials, яка повертає значення всіх матеріалів у вигляді списку, та функції iProperties Matherial Of Component ("Part1:1"), яка присвоює або повертає значення матеріалу певного компоненту. Звернення до компоненту нижчого рівню відбувається за допомогою розширеної функції iProperties Matherial Of Component MakePath (через кому вказується повний шлях до компоненту). Спочатку привласнюємо значення всіх матеріалів певному параметру (параметр «матеріали») у вигляді списку, а потім прирівнюємо цей параметр до кожного необхідного компоненту. Звертання до кожного компоненту окремо має дещо громіздкий та нераціональний вигляд, але це необхідно для можливості контролю над кожним елементом в подальшому.

Приклад коду:

```
Multi Value List("матеріал") = iProperties Matherials  
iProperties Matherial Of Component ("ANSI 1 x 0.133 00000001:1") =  
матеріал
```

Для реалізації наступної функції ми скористалися можливістю створення власної змінної в середовищі iLogic – Shared Variable ("ім'я"). Вона необхідна для того, щоб виразити функцію маси – iProperties Mass ("ім'я компоненту").

Для кожного компоненту потрібна своя змінна, в подальшому значення маси компонентів будуть додаватися для відображення загальної маси рами. Сума буде присвоюватися параметру «маса», котрий в подальшому буде введений на форму.

Наступна використана функція дозволяє скористатися будь-яким параметром моделі/збірки (до цього ми мали справу тільки з користувальними параметрами) для повернення або присвоєння його значення. З її допомогою ми отримали змогу змінювати товщину та діаметр перерізу труби, що надає змогу використовувати не тільки стандартні типи труб Inventor, а й будь-які інші. Значення можна буде вводити вручну в формі за допомогою користувальних параметрів «перетин» та «товщина».

Вікно редагування з необхідними правилами показано на (Рис. 6).

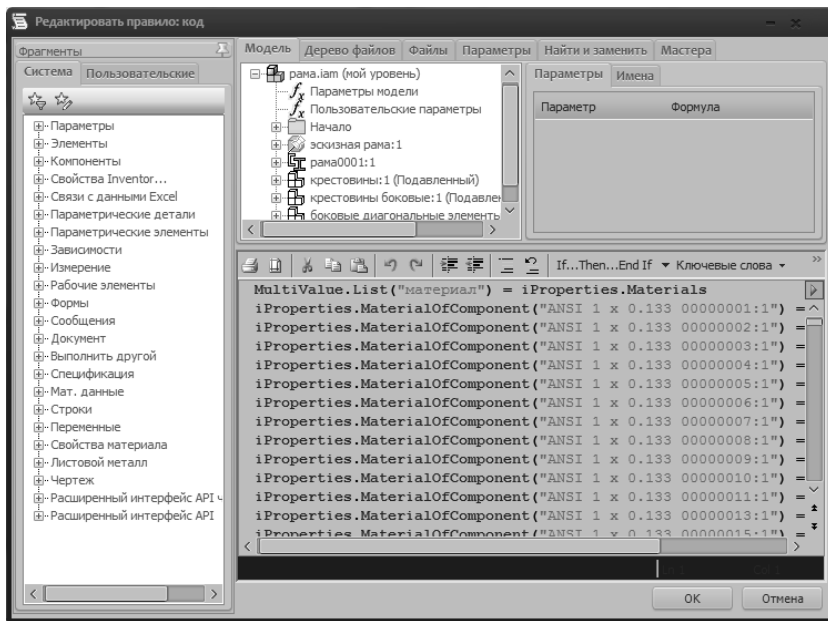


Рисунок 6

Після створення програмного додатку було проведено симуляції фронтального та бокового впливів достатньої сили (близької до сили зіткнення) різних модифікацій рами та матеріалів. При проведенні симуляції використовувались наступні матеріали: вуглеволокно, сталь та алюміній. Досліджувався характер деформації при фронтальному (Рис. 7) та бічному навантаженні (Рис. 8).

За результатами симуляцій було встановлено що вуглеволокно неекономічне для використання та є занадто незручним для виготовлення саме просторової рами (потрібні спеціальні та дорогі засоби формування рами як суцільного тіла). Отже вуглеволокно є зовсім неприйнятним матеріалом.

При застосуванні сталі майже не змінився характер деформацій, але на декілька пунктів змінилася її амплітуда. В цьому та в низькій вартості сталь є набагато кращим матеріалом ніж вуглеволокно, але спостерігаючи за масою за допомогою нашого додатку, ми побачили величезний приріст в масі рами: з 9,2 кг при вуглеволокні, до 50,5 кг при сталі. Таким чином нам необхідно знайти компромісний матеріал. Проводимо тестування для алюмінію. Порівняно зі сталлю амплітуди деформацій зросли майже в 2,5 рази, але не змінився їх характер. Також рама з алюмінію має значно меншу вагу: 17,4 кг з

алюмінієм проти 50,5 кг зі сталлю. Таким чином алюміній і є тим самим компромісним матеріалом, який найкраще підійде для нашої рами. Він відносно дешевий та легко зварюється (економічність, легкість монтажу), він досить легкий та має достатній запас міцності (характер деформацій не змінився).

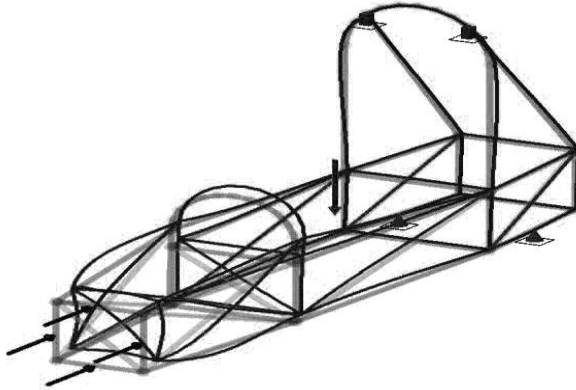


Рисунок 7

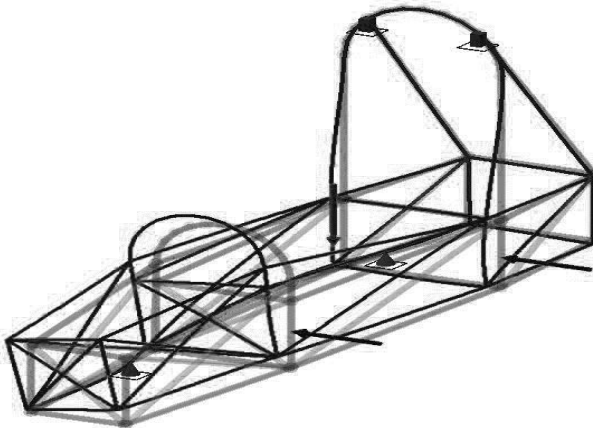


Рисунок 8

Результати розрахунків сил та моментів реакцій у залежностях для симуляції при фронтальному навантаженні для повній конфігурації рами наведено у табл. 1, а зведення за статичними результатами наведено у табл. 2.

Таблиця 1

Назва залежності	Сила реакції		Реактивний момент	
	Величина	Компоненти (Fx,Fy,Fz)	Величина	Компоненти (Mx,My,Mz)
Залежність фіксації:1	2575,612 Н	10,030 Н	168528,500 Н мм	-18629,602 Н мм
		305,934 Н		-1861,320 Н мм
		2557,358 Н		-167485,309 Н мм
Опора:1	16686,522 Н	1405,550 Н	0,000 Н мм	-0,000 Н мм
		-276,022 Н		-0,000 Н мм
		16624,929 Н		0,000 Н мм
Опора:2	18164,099 Н	-1407,795 Н	0,000 Н мм	0,000 Н мм
		-289,508 Н		-0,000 Н мм
		18107,148 Н		0,000 Н мм
Залежність фіксації:2	2733,319 Н	-7,785 Н	175744,862 Н мм	-23217,264 Н мм
		351,860 Н		7516,361 Н мм
		2710,565 Н		174042,293 Н мм

Таблиця 2

Назва		Мінімальна	Максимальна
Зміщення		0,000 мм	3,776 мм
Сили	Fx	-5807,145 Н	5392,346 Н
	Fy	-611,948 Н	2710,565 Н
	Fz	-7624,968 Н	17948,246 Н
Моменти	Mx	-150986,865 Н мм	150381,076 Н мм
	My	-303560,854 Н мм	492132,556 Н мм
	Mz	-26753,042 Н мм	17998,169 Н мм
Нормальне напруження	Smax	-76,900 МПа	519,081 МПа
	Smin	-528,260 МПа	36,493 МПа
	Smax(Mx)	-0,000 МПа	147,706 МПа
	Smin(Mx)	-147,706 МПа	0,000 МПа
	Smax(My)	0,000 МПа	481,439 МПа
	Smin(My)	-481,439 МПа	-0,000 МПа
	Saxial	-86,562 МПа	36,774 МПа
Напруження зсуву	Tx	-51,380 МПа	55,333 МПа
	Ty	-25,827 МПа	5,831 МПа
Напруження кручення	T	-8,804 МПа	13,086 МПа

## **Висновки**

У роботі розглянуто технологію створення програмного модулю для управління тривимірної моделлю рами спортивного автомобілю. Задачу вирішено за допомогою САПР Autodesk Inventor Professional у середовище iLogic. Наведено послідовність створення програмного додатка та зручний користувальницький інтерфейс. З використанням розробленого модуля було проведено дослідження симуляції при фронтальному навантаженні для повній конфігурації рами для трьох матеріалів. Це дозволило знайти оптимальну конфігурацію конструкції рами та матеріал спортивного автомобіля. Запропонована технологія створення програмних модулів дозволяє проводити дослідження для параметричних моделей різних механізмів, які створені у САПР Autodesk Inventor Professional.

**Список використаних джерел:** 1. *В.М. Тонконогий, В.М. Тігарев, К.В. Козирева.* Розробка параметричної тривимірної моделі просторової рами автомобіля. Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип. 9, Харків, НТУ "ХПІ", 2014, – с. 216-228. 2. *Michael Costin, David Phipps.* Racing and sports car chassis design. – London: V. T. Batsford Ltd, 1965. – 146 с. 3. *Фентон Дж.* Несущий каркас кузова автомобиля и его расчет. – М.: Машиностроение, 1984. – 200с. 4. *Том Трембли* Autodesk Inventor 2013 и Inventor LT 2013. Основы. Официальный учебный курс /. – М.: ДМК-Пресс, 2013. – 348 с. 5. *Curtis Waguespack.* Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014. – Sybex, 2013. – 1032 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. *V.M. Tonkonogij, V.M. Tigarev, K.V. Kozireva.* Rozrobka parametrichnoї trivimirnoї modeli prostorovoї rami avtomobilja. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni. – Vip. 9, Harkiv, NTU "HPI", 2014, – s. 216-228. 2. *Michael Costin, David Phipps.* Racing and sports car chassis design. – London: V. T. Batsford Ltd, 1965. – 146s. 3. *Fenton Dzh.* Nesushhij karkas kuzova avtomobilja i ego raschet. – M.: Mashinostroenie, 1984. – 200s. 4. *Tom Trembli* Autodesk Inventor 2013 i Inventor LT 2013. Osnovy. Oficial'nyj uchebnyj kurs /. – M.: DMK-Press, 2013. – 348 s. 5. *Curtis Waguespack.* Mastering Autodesk Inventor 2014 and Autodesk Inventor LT 2014. – Sybex, 2013. – 1032 p.

УДК 004.422.83

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, Якимов А.А. д-р техн. наук,  
И.С. Синько канд. техн. наук, Одесса, Украина

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ С АКУСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ**

*У статті розглядається розробка моделі проектування приміщень з акустичними властивостями. Розробляється модель дозволяє розрахувати геометричне відображення звукових хвиль від поверхонь різної складності і підвищити точність результатів проектування.*

**Ключові слова:** акустичне середовище, розповсюдження волн, проектування приміщень

*В статье рассматривается разработка модели проектирования помещений с акустическими свойствами. Разрабатываемая модель позволяет рассчитать геометрическое отражение звуковых волн от поверхностей различной сложности и повысит точность результатов проектирования.*

**Ключевые слова:** акустические среды, распространение волн, проектирование помещений

*The article discusses the development of the design space models with acoustic properties. The developed model makes it possible to calculate the geometric reflection of sound waves on surfaces of varying complexity and improve the accuracy of the results at the design stage.*

**Keywords:** acoustical space, wave propagation, designing spaces

История компьютерного моделирования в акустике помещения в последние 40 лет создала серьезную альтернативу для оценки качества звучания помещений не на основе натуральных измерений, а на основе виртуальных моделей. Проведенный анализ литературы и аналогов показывает, что в настоящее время не существует эффективных методов, применимых к многократным отражениям волн от поверхностей различной сложности. Касаясь проблематики, рассматриваемой в данной работе, заметим, что развитие численных методов и рост быстродействия компьютеров позволили перейти от простых инженерных формул к точным математическим моделям, основанным на использовании волнового и геометрических подходов в акустике, что предполагает использование таких методов как:

- МКЭ (метод конечных элементов), используется для расчётов откликов объёма исследуемой среды на внешние воздействия и нахождения собственных мод [1];
- МГИУ (метод граничных интегральных уравнений). Иногда, в соответствие с западной терминологией, для него используется название Метод граничных элементов (МГЭ) [2], который, по сути, является просто дискретной версией МГИУ [3].

Используется для исследований задач в областях с различными акустическими свойствами, а также для решения задач совместных колебаний сооружений и акустической (или упругой) среды;

- Физическая теория дифракции [4]. Основанная на эвристических идеях Кирхгофа и получившая дальнейшее развитие с применением строгих методов в современных работах [5], эта теория эффективна на высоких частотах колебания, когда длина волны намного меньше характерного размера отражателей.

- Геометрическая теория дифракции [6]. Эта теория основана на асимптотическом анализе волновых процессов, когда частота колебания стремится к бесконечности. В отличие от физической теории, обычно дает не только главный, но и второй член асимптотики.

- Аффинные преобразования. Матричное представление используется для записи аффинных преобразований в компьютерной графике [7].

- Лучевая теория дифракции [8]. Основана на аналогии в распространении звуковых и световых волн в области предельно высоких частот колебания в виде лучей, распространяющихся в пространстве и отражающихся на поверхностях препятствий.

Целью работы является разработка модели и компьютерная реализация геометрического распространения волн в акустических средах, создание программного средства для расчёта геометрии отражений звуковых волн.

Для построения отражения звуковой волны от объекта используются аффинные преобразования. В этом случае проще отражать по координатной плоскости. Для отражения необходимо, чтобы определитель преобразования был равен  $-1,0$ . Матрицы преобразования относительно плоскостей соответственно  $xy$ ,  $yz$ , и  $xz$  следующие [7]:

$$T_{xy} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_{yz} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad O_{xz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Отражение относительно другой плоскости можно получить путем комбинации вращения и отражения.

Трёхмерный линейный перенос определяется выражением:



$$[X \ Y \ Z \ h] = [x \ y \ z \ 1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ l & m & n & 1 \end{bmatrix} . \quad (2)$$

Отражение относительно произвольной плоскости выполняется с помощью процедуры, объединяющей ранее определенные простые преобразования.

Тогда общее преобразование описывается матрицей

$$[M] = [T][R_x][R_y][Rfltz][R_y]^{-1}[R_x]^{-1}[T]^{-1} , \quad (3)$$

где матрицы  $[T]$ ,  $[R_x]$ ,  $[R_y]$  задаются уравнениями соответственно;  $Rfltz$  – матрица отражения относительно плоскости  $z = 0$ ;  $(x_0, y_0, z_0) = (P_x, P_y, P_z)$  – координаты точки  $P$  на плоскости отражения;  $a(c_x, c_y, c_z)$  есть вектор нормали к плоскости отражения.

После формирования математической модели отражения звуковых волн разрабатывается компьютерная модель, реализующая расчет отражения волны от поверхностей модели помещения. Алгоритм работы программы следующий [9, 10]:

– Для вызова программы используется команда Surface – команда указания типа, коэффициента поглощения и площади помещения (рис.1).

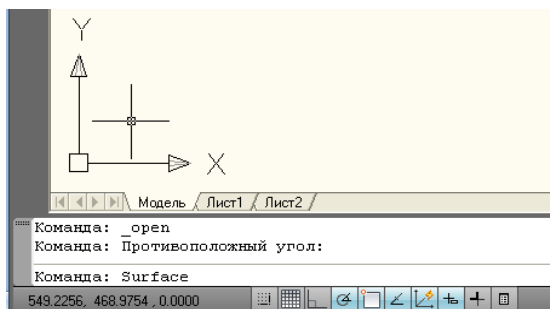


Рисунок 1 – Вызов программы

– После вызова программа предлагает выбрать поверхность для задания следующих параметров: тип поверхности, коэффициента поглощения и площади помещения. Таким образом задаются параметры всех поверхностей помещения.

– Далее, вызвав команду вставки динамика Dinamik, вставляется ранее разработанный и сохраненный блок с динамиком, как изображено на рис.2.

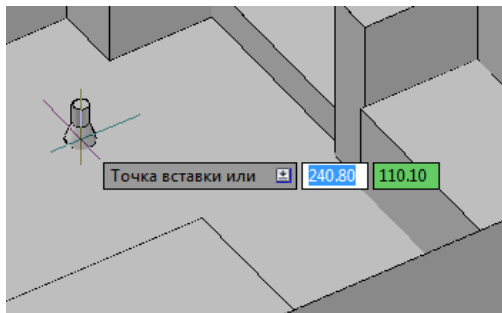


Рисунок 2 – Вставка динамика

– Необходимо выбрать отражающие и принимающие поверхности, потом выбрать источники звука; задать точку приема звука. Затем программа ведет расчет отражений волн от поверхностей и показывает возможные пути попадания звука от источника в точку приема (рис. 3).

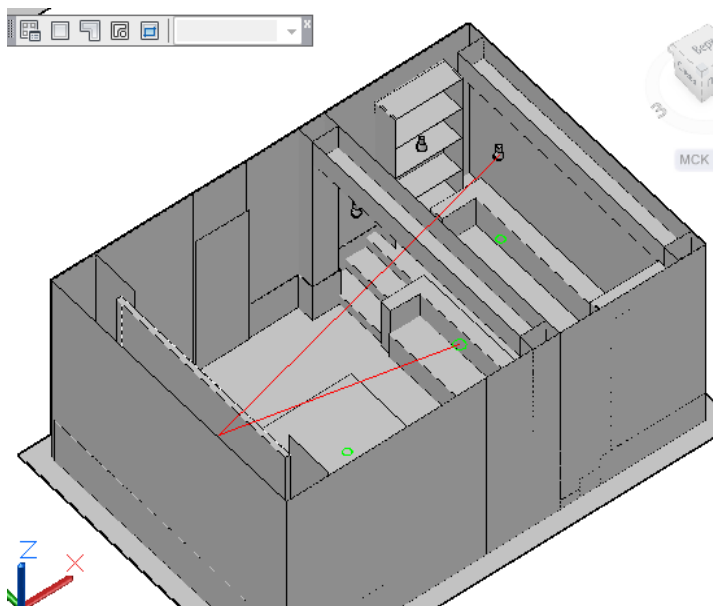


Рисунок 3 – Работа программы. Звуковые волны

Пример работы программы з цилиндрической и сферической поверхностями приведен на рис. 4 и 5. Блок-схема работы программы представлена на рис.6.

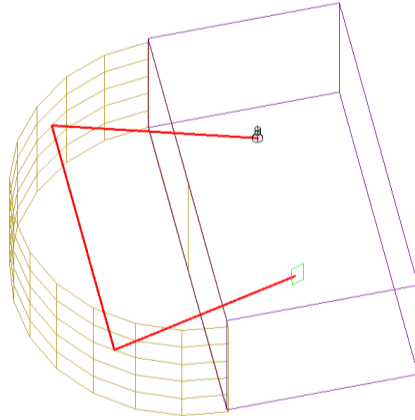


Рисунок 4 – Отражение от вертикальной цилиндрической поверхности

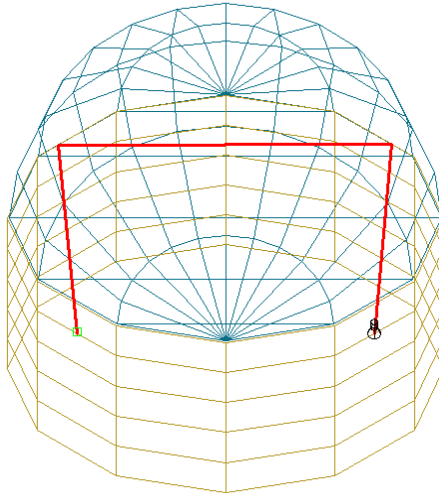


Рисунок 5 – Отражение от вертикальной сферической поверхности

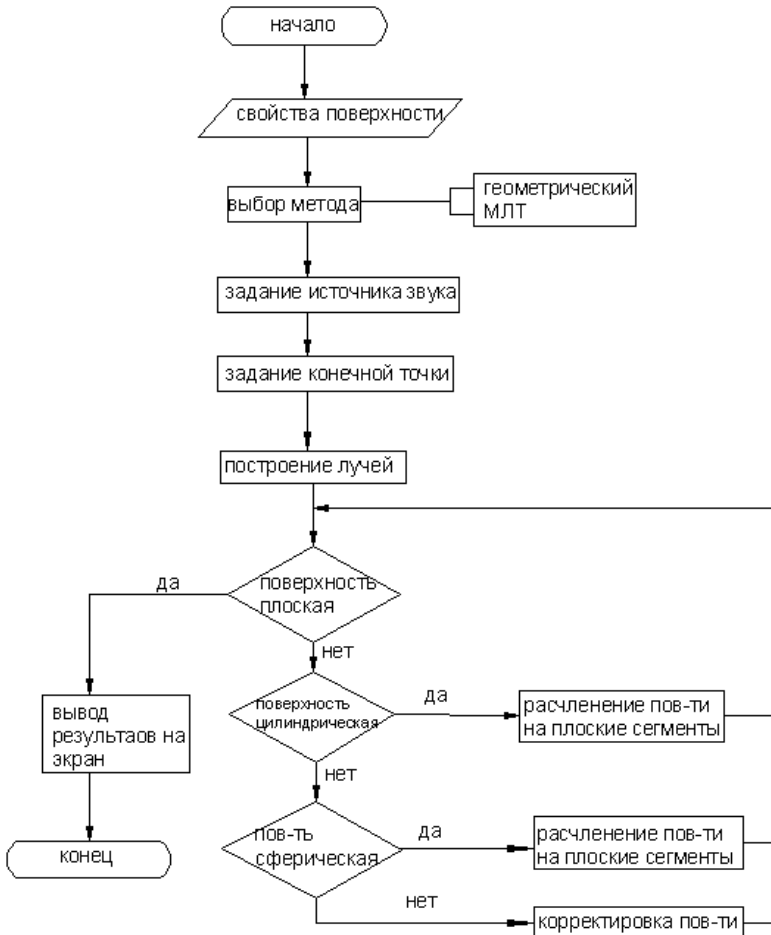


Рисунок 6 – Блок-схема работы программы

Выводы: в данной работе создана и исследована новая модель распространения волн в акустических средах, обеспечивающая расчёт полной структуры переотражений звуковых лучей и обладающая возможностями проведения экспериментов с помощью средств компьютерной графики, что в ряде случаев позволяет получать более точные результаты, чем в существующих системах акустического моделирования.

**Список использованных источников:** 1. *Присекин В.Л., Расторгуев Г.И.* Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел. НГТУ: 2010. – 238 с. 2. *Алейников С.М.* Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих, пространственно неоднородных оснований. АСВ, 2000. – 754 с. 3. *Баклашов И.В., Картозия Б.А., Шащенко А.Н., Борисов В.Н.* Геомеханические процессы Учебник для вузов. Том 2. М.: МГТУ, 2004. – 49 с. 4. *Уфимцев П.Я.* Основы физической теории дифракции. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 350 с. 5. *Scarpetta E., Sumbatyan M.A.* An asymptotic estimate of the edge effects in the high frequency Kirchhoff diffraction theory for 3d problems // *Wave Motion*. 2011. V. 48. P. 408-422. 6. *Зозуля В.В., Мартыненко А.В., Лукин А.Н.* Механика сплошной среды. Харьков: Изд-во Нац. ун-та внутренних дел, 2003. – 600с. 7. *Розендорн Э.Р.* Теория поверхностей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 304 с. 8. *Ильин А.М., Данилин А.Р.* Асимптотические методы в анализе. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 250 с. 9. *Синько И.С., Молчан Е.Г.* Акустические свойства промышленных помещений и зданий многоцелевого назначения. Проблемы техники. Наук.-вироб. журн. / Одес. нац. мор. ун-т, Хмельн. нац. ун-т. – Одеса, 2014. – №2. – С. 90-96. 10. *Б.В. Лебедев, И.С. Синько.* Автоматизированный расчет освещения помещений. Проблемы техники. Наук.-вироб. журн. / Одес. нац. мор. ун-т, Хмельн. нац. ун-т. – Одеса, 2011. – №2. – С. 64-69.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Prisekin V.L., Rastorguev G.I.* Osnovy metoda konechnyh jelementov v mehanike deformiruemyh tel. NGTU: 2010. – 238 s. 2. *Alejnikov S.M.* Metod granichnyh jelementov v kontaktnyh zadachah dlja uprugih, prostranstvenno neodnorodnyh osnovanij. ASV, 2000. – 754 s. 3. *Baklashov I.V., Kartozija B.A., Shashenko A.N., Borisov V.N.* Geomechanicheskie processy Uchebnik dlja vuzov. Tom 2. M.: MGGU, 2004. – 49 s. 4. *Ufimcev P.Ja.* Osnovy fizicheskoj teorii difrakcii. - M.: BINOM. Laboratorija znaniy, 2009. – 350 s. 5. *Scarpetta E., Sumbatyan M.A.* An asymptotic estimate of the edge effects in the high frequency Kirchhoff diffraction theory for 3d problems // *Wave Motion*. 2011. V. 48. P. 408-422. 6. *Zozulja V.V., Martynenko A.V., Lukin A.N.* Mehanika sploshnoj sredy. Har'kov: Izd-vo Nac. un-ta vnutrennih del, 2003. – 600с. 7. *Rozendorn Je.R.* Teorija poverhnostej. M.: FIZMATLIT, 2006. – 304 s. 8. *Il'in A.M., Danilin A.R.* Asimptoticheskie metody v analize. M.: FIZMATLIT, 2009. – 250 s. 9. *Sin'ko I.S., Molchan E.G.* Akusticheskie svojstva promyshlennyh pomeshhenij i zdaniy mnogocelevego naznachenija. Problemi tehniki. Nauk.-virob. zhurn. / Odes. nac. mor. un-t, Hmel'n. nac. un-t. – Odesa, 2014. – №2. – S. 90-96. 10. *B.V. Lebedev, I.S. Sin'ko.* Avtomatizirovannyj raschet osveshhenija pomeshhenij. Problemi tehniki. Nauk.-virob. zhurn. / Odes. nac. mor. un-t, Hmel'n. nac. un-t. – Odesa, 2011. – №2. – S. 64-69.

УДК 621.919

С.Є. Шейкін, д-р техн. наук, С.Ф. Студенець,  
В.В. Мельниченко, Я.В. Мельниченко, Київ, Україна

## **ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ КАРДАННИХ ВАЛІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ГРАДІЄНТНОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ**

*В статті описано промислову технологію відновлення шлицьових вилок головних карданних валів дизель-поїздів Д-1. Використання такого ресурсозберігаючого метода холодного пластичного деформування, як редукування на оправці дозволило підвищити експлуатаційний ресурс шлицьового з'єднання карданних валів за рахунок градієнтного деформаційного зміцнення шлицьових втулок в процесі їх формоутворення.*

**Ключові слова:** відновлення шлицьових вилок, холодне пластичне деформування

*В статье описана промышленная технология восстановления шлицевых вилок главных карданных валов дизель-поездов Д-1. Использование такого ресурсосберегающего метода холодного пластического деформирования, как редуцирование на оправке позволило повысить эксплуатационный ресурс шлицевого соединения карданных валов за счет градиентного деформационного упрочнения шлицевых втулок в процессе их формообразования.*

**Ключевые слова:** восстановление шлицевых вилок, холодное пластическое деформирование

*The industrial restoration technology for splined forks of major driveshafts of diesel trains D-1 is described in the paper. Using such resource-saving method of cold plastic deformation as reduction in fixture let us to increase the in-use life of splined joint of driveshafts owing to gradient strain hardening of splined bushings during their formation.*

**Keywords:** restoration of splined forks, strain hardening

На даний час існує закономірна тенденція заміни процесу різання на процес холодного пластичного деформування (ХПД) у формоутворенні поверхонь деталей машин. Головними перевагами ХПД є підвищення продуктивності обробки, усунення або значне скорочення відходів металу, створення сприятливого поєднання механічних властивостей одержуваних виробів, що дозволяє в ряді випадків забезпечити їх високу працездатність без хіміко-термічної обробки. Практичне використання методів ХПД в машинобудівні показало значні їхні переваги в порівнянні з іншими при обробці як наскрізних [1-3] так і глухих отворів [4]. Результати, наведені в [1] показують, що відбувається значне зменшення зносу пластично деформованих поверхонь в процесі приробляння рухомих з'єднань в порівнянні з поверхнями, отриманими в процесах обробки різанням. Особливу актуальність набуло використання методів ХПД для виготовлення внутрішніх порожнин складної конфігурації. Прикладами таких деталей є зубчасті муфти, колеса з внутрішнім зачепленням, шлицьові втулки рульових

колонок, карданних валів автомобілів і залізничних поїздів, деталі сервоуправління гідро трансмісії сільськогосподарської техніки тощо. У країнах з розвиненим машинобудуванням щорічна потреба в таких видах деталей складає десятки та сотні тисяч штук на рік.

На сьогодні створено ряд методів ХПД для формування таких профілів. Основними з них є радіальне кування, ударне накочування, штампування, накочування увігнутими сегментами та редукування із застосуванням волок. Дані методи пов'язані з зменшенням зовнішнього діаметра заготовок, в процесі якого оправка із певним зовнішнім профілем, розташована всередині заготовки, формує дзеркальний по відношенню до власного, внутрішній профіль деталі. Вони можуть бути використані для формування складних поздовжніх внутрішніх профілів підвищеної точності в деталях типу втулка при товщині стінки, яка складає 10-50 % від величини діаметра отвору. Вони відрізняються конструкцією інструменту і характером його рухів щодо поверхні, яка деформується [3].

У той же час, метод редукування заготовок через волокнисті застосуванням профільної оправки має ряд суттєвих переваг в порівнянні з іншими вищезазначеними. По-перше, для здійснення редукування заготовки через волоку потрібно лише найпростіший прямолінійний рух волокнисті. По-друге, точність деталей, одержуваних у процесі редукування, практично не залежить від вхідної точності заготовки. По-третє, твердосплавні волокнисті, які застосовують для обтиску зовнішньої поверхні заготовки, мають високу стійкість і простоту конструкції. По-четверте, в процесі формоутворення деталі відбувається градієнтне деформаційне зміцнення матеріалу, що приводить до підвищення експлуатаційних характеристик виробів. По-п'яте, процес забезпечує значну економію металу [1].

Прогресивним способом отримання втулок з внутрішніми шліцьовими поверхнями є вісесиметричне редукування на рухомій оправці (рис. 1). При використанні даної схеми в процесі обробки відбувається зменшення зовнішнього діаметра трубчастої заготовки з одночасним копіюванням її внутрішньою поверхнею профілю шліцьової оправки.

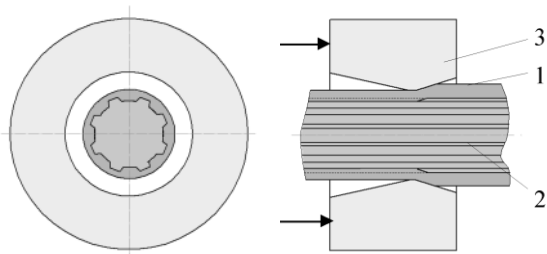


Рисунок 1 – Схема редукування на фасонній оправці

Складність виготовлення профільної оправки (рис. 2) залежить, перш за все, від форми профілю отримуваної внутрішньої поверхні. Технологічна оснастка, як правило, складається з ряду корпусних деталей, пов'язаних між собою точним взаємним розташуванням.

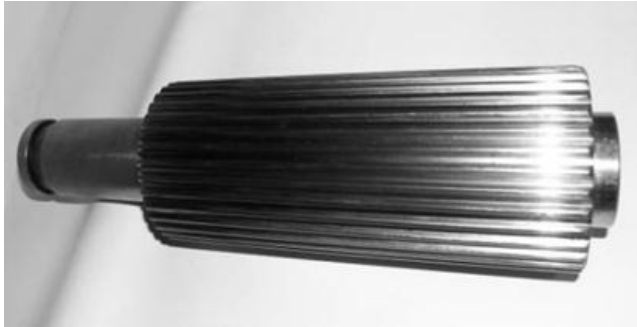


Рисунок 2 – Зовнішній вигляд шліцьової оправки

На сьогодні на залізницях України експлуатуються дизель-поїзди імпортного виробництва (Угорщина, Румунія, Росія), які залишилися з радянських часів. На кожному дизель-поїзді типу Д-1 встановлено два карданних вала (рис. 3), які періодично зношуються на ділянці шліцьового з'єднання. В Україні ці деталі не виготовляються, а придбання імпортних пов'язано з витратою валюти. Саме тому розробка нових технологій, які б дозволяли відновлювати дані вузли в Україні, є дуже актуальною задачею.



Рисунок 3 – Головні карданні вали дизель-поїзда Д-1

Основною проблемою при вирішенні цієї задачі є труднощі у виготовленні шліцьової втулки. Для формування поверхні внутрішніх шліців у вилках можна застосувати ріжуче протягування, яке має ряд недоліків і обмежень. А саме, складність і висока вартість ріжучих протяжок,



необхідність використання протяжних верстатів, які займають значні виробничі площі.

Однак, вирішити цю задачу можливо застосувавши для виготовлення шліцьових втулок технологію редукування на рухомій фасонній оправці (рис. 1). Заготовку (1) з мінімальним зазором одягають на фасонну оправку (2), профіль якої відповідає профілю отвору шліцьової втулки. Далі проводять редукування інструментом (3). При цьому відбувається подовження деталі і оправка має можливість рухатись разом з оброблюваним металом в напрямку подовження.

Основна перевага використання даного процесу – можливість отримати градієнтне деформаційне зміцнення оброблюваної деталі, що дозволить збільшити її експлуатаційний ресурс. Дана схема найбільш придатна, для формування глибоких внутрішніх профілів, що вимагають значних деформацій заготовки.

Застосування методу редукування на оправці було успішно реалізовано в технологічному процесі відновлення шліцьового з'єднання карданної пари дизель-поїзда Д-1. Був здійснений комплексний підхід до рішення цієї задачі. Відновлювалися обидва елементи шліцьової пари - вилка і вал. При цьому число зубів в з'єднанні зменшили до 34, а діаметр ділильного кола – до 85 мм. Зменшення діаметру з'єднання дозволило видаляти весь профіль зношених зубів і на циліндричній поверхні меншого діаметру нарізати нові евольвентні зуби. При відновленні вилки з'являється можливість вільніше оперувати параметрами шліців і товщиною редукованої втулки для найбільш сприятливого процесу формування зубів.

Основними задачами, які вирішувалися в процесі створення нової технології були:

- розрахунок, розробка та проектування інструменту та оснастки, вибір інструментальних матеріалів;
- експериментальне вивчення впливу технологічних режимів на силові характеристики та характер процесу формоутворення внутрішньої шліцьової поверхні;
- вибір технологічних антифрикційних змащень для зменшення силових навантажень на інструмент та запобігання схоплюванню.

Характеристики відновленого шліцьового з'єднання наведені в таблиці.

Шліцьове евольвентне з'єднання з такими параметрами задовольняє технічним вимогам до карданного валу дизель-поїзда Д-1 (передача потужності  $N=750$  к.с. з частотою обертання  $n=1250$  об/хв.) та здатне замінити зношене з'єднання 100x2,5x38 ГОСТ6038-80 [5, 6].

В якості матеріалу заготовки застосовували сталь 20Х. Перед редукуванням заготовки відпалювали.

Шліцьові втулки, отримані за розробленою технологією представлені на рис. 4.

Таблиця

Характеристики шліцьового з'єднання 90x2,5x9H/9g ГОСТ6033-80			
№ п/п	Назва	Позначення	Величина
1	Число зубів	$z$	34
2	Модуль	$m$	2,5 мм
3	Діаметр ділильного кола	$d$	85(+0,22) мм
4	Діаметр основного кола	$d_b$	73,612 мм
5	Номінальний вихідний діаметр з'єднання	$D$	90 мм
6	Зміщення вихідного контуру	$X_m$	1,125 мм
7	Кут профілю зуба	$\alpha^\circ$	30°
8	Ділильний окружний шаг зубів	$\rho$	7,854 мм
9	Радіус кривизни перехідної кривої зуба	$\rho_f$	0,4 мм
10	Діаметр кола впадин зуба втулки	$D_f$	90,5(+0,35) мм
11	Діаметр кола вершин зуба втулки	$D_a$	84,5(+0,22) мм
12	Висота зуба втулки	$H_{min}$	2,5 мм
		$H_{max}$	2,75 мм
13	Діаметр кола граничних точок зуба втулки	$D_l$	89,8 мм
14	Номінальна ділильна окружна ширина впадини втулки	$l$	5,226H

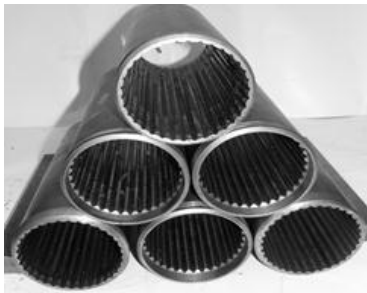


Рисунок 4 – Шліцьові втулки, отримані редукуванням на оправці

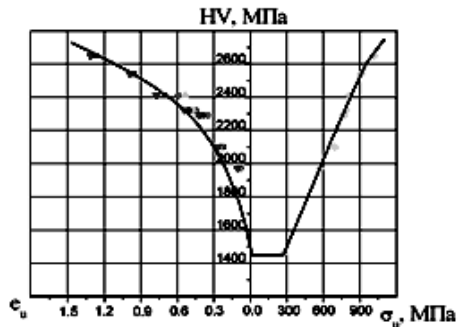


Рисунок 5 – Тарувальний графік сталі 20Х

Редукування на шліцьовій оправці є процесом, який характеризується великими контактними напруженнями, які в 3-4 рази більші, ніж при редуванні без оправки.

В результаті проведення експериментальних досліджень впливу технологічних режимів редукування на характер формування внутрішньої шліцьової поверхні та силові параметри процесу було

встановлено, що для отримання повноцінного евольвентного профілю доцільно застосовувати три цикли деформування.

При цьому, оптимальна величина осьової сили редукування по критерію заповнюваності профілю оправки на першому циклі деформації складає  $P_{ос}=700$  кН.

На другому –  $P_{ос}=640$  кН та  $P_{ос}=720$  кН на третьому. Зменшення осьової сили редукування без втрати якості може бути досягнуто шляхом збільшення циклів деформації та перерозподілом натягів на волокна.

В умовах редукування для запобігання схоплювання контактуючих поверхонь необхідно використовувати змащення, які проявляють, насамперед, високі екрануючі властивості, при цьому основне значення має міцність екрануючого шару, а вже потім його антифрикційні властивості. Для зменшення силових навантажень на інструмент та запобігання схоплюванню в процесі редукування ефективним є використання твердих змащень в комплексі з рідкими мастилами. В якості твердих змащень найбільший ефект досягається при використанні алкідно-уретанового лаку у якості зв'язуючого з дрібно дисперсним графітом при співвідношенні до наповнювача рівному 5:1. Для вивчення напружено-деформованого стану внутрішніх шліцьових поверхонь побудовано тарувальні графіки в координатах “твердість – відносна деформація” та “твердість – інтенсивність напруг” для сталі 20 (рис.5).

Для визначення інтенсивності деформації та напружень з заготовок на різних стадіях формування шліцьового профілю виготовляли поперечні шліфи (рис. 6) та досліджували розподіл мікротвердості.

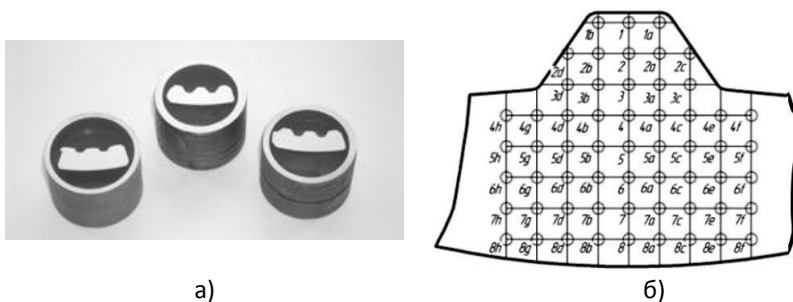


Рисунок 6 – Зразки для дослідження мікротвердості:  
а) фото шліфів; б) масиви точок заміру мікротвердості на поперечному шліфі

Результати дослідження мікротвердості дозволяють встановити картину розподілу інтенсивності деформацій та напружень в шліцьовому профілі редукованих втулок (рис. 6). Заміри проводились на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням 0,49 Н.

Весь діапазон значень мікротвердості, інтенсивності деформацій та напружень розбито на чотири діапазони для волок 1, 2 та 3 (рис. 7).



Рисунок 7 – Ізолінії (ізосклери) твердості HV, інтенсивності напружень  $\sigma_n$  та інтенсивності деформації  $e_u$

- 1 – HV<1,6 ГПа,  $\sigma_n$ >0,45 ГПа,  $e_u$ <0,15  
2 – HV=1,6-1,9 ГПа,  $\sigma_n$ =0,45-0,6 ГПа,  $e_u$ =0,15-0,4  
3 – HV=1,9-2,25 ГПа,  $\sigma_n$ =0,6-0,72 ГПа,  $e_u$ =0,4-0,5

З рисунку видно, що мікротвердість після редукування заготовки через волокна 1-3 загалом збільшується. Можна констатувати, що об'єм зон з меншою твердістю поступово зменшується та локалізується в основному біля зовнішньої поверхні, де матеріал плине в бік подовження довжини заготовки. Аналіз експериментальних даних свідчить, що в процесі редукування твердість заготовки підвищується в середньому в 1,3 рази. Найбільш помітно твердість збільшується біля внутрішньої поверхні заготовки – вершин зубів, бокових поверхонь зубів та впадин.

## ВИСНОВКИ

1. Створена технологія відновлення та шліцьових вилок карданних валів дизель-поїздів Д-1 забезпечує градієнтне деформаційне зміцнення матеріалу виробу на 35%, що суттєво підвищує експлуатаційний ресурс карданних валів. При цьому точність профілю виробу відповідає вимогам креслень нового карданного валу.

2. Стендові випробування відновлених карданних валів дозволили прогнозувати збільшення ходового експлуатаційного ресурсу в 1,6 рази.

3. Розроблена технологія використовується в умовах ІНМ ім. В.Н. Бакуля НАН України для відновлення карданних валів дизель-потягів для вагоноремонтного підприємства «Жмеринське підприємство «Експрес» м. Жмеринка

4. Вартість відновленого карданного валу нижче імпортного в 1,5 рази.

**Список використаних джерел:** 1. *О.В. Нахайчук.* Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: монографія / *О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, та ін.* – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с. 2. *В.А. Огородников* Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації: монографія / *В.А. Огородников, В.І. Музичук та ін.* – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 179 с. 3. *О.А. Розенберг, Б.П. Траченко* Формообрання шлицевих отверстий в трубних заготовках методом холодного пластического деформирования/ *О.А. Розенберг, Б.П. Траченко* // *Технология и организация производства.* – 1991. – №2. – С. 20-23. 4. *О.А. Розенберг* Деформируемость металла при формировании внутренних шлицевых поверхностей в глухих отверстиях методом холодного пластического деформирования (Сообщение 1) / *О.А. Розенберг, С.Ф. Студенец та ін.* // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії:* 36. наук, праць. – Краматорськ, 2007. – № 1 (7). – С. 117-120. 5. Розрахунок несучої здатності з'єднання з натягом при відновленні шлицьового з'єднання / *В.А. Огородников, О.О. Розенберг та ін.* // *Вісник ВПІ.* – 2002. – № 66. – С. 82-85. 6. *В.А. Огородников* Оценка прочности после восстановления шлицевого соединения вала дизель-поезда / *В.А. Огородников., О.В. Нахайчук* / *Дні науки – 2005:* 36. наук. пр. міжнар. НПК. – Дніпропетровськ: Том 35. Техніка. С. 29-30.

**Bibliography (transliterated):** 1. *O.V. Nahajchuk.* Novi tehnologichni procesi z vikoristannjam progresivnih metodiv plastichnogo deformuvannja: monografija / *O.V. Nahajchuk, O.O. Rozenberg, ta in.* – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2008. – 158 s. 2. *V.A. Ogorodnikov* Mehanika procesiv holodnogo formozminjuvannja z odnotipnimi shemami mehanizmu deformacii: monografija / *V.A. Ogorodnikov, V.I. Muzichuk ta in.* – Vinnicja : UNIVERSUM-Vinnicja, 2007. – 179 s. 3. *O.A. Rozenberg, B.P. Trachenko* Formoobrazovanija shlicevych otverstij v trubnyh zagotovkah metodom holodnogo plasticheskogo deformirovanija/ *O.A. Rozenberg, B.P. Trachenko* // *Tehnologija i organizacija proizvodstva.* – 1991. – №2. – S. 20-23. 4. *O.A. Rozenberg* Deformiruemost' metalla pri formirovanii vnutrennih shlicevych poverhnostej v gluhih otverstijah metodom holodnogo plasticheskogo deformirovanija (Soobshhenie 1) / *O.A. Rozenberg, S.F. Studenec ta in.* // *Visnik Donbas'koї derzhavnoї mashinobudivnoї akademii:* 36. nauk, prac'. – Kramators'k, 2007. – № 1 (7). – S. 117-120. 5. Rozrahunok nesuchoї zdatnosti z'ednannja z natjagom pri vidnovlenni shlic'ovogo z'ednannja / *V.A. Ogorodnikov, O.O. Rozenberg ta in.* // *Visnik VPI.* – 2002. – № 66. – S. 82-85. 6. *V.A. Ogorodnikov* Ocenka prochnosti posle vosstanovlenija shlicevogo soedinenija vala dizel'-poezda / *V.A. Ogorodnikov., O.V. Nahajchuk* / *Dni nauki – 2005:* 36. nauk. pr. mizhnar. NPK. – Dnipropetrovs'k: Tom 35. Tehnika. S. 29-30.

В.Г. Шкурупий, канд. техн. наук, Харьков, Украина

## **УСЛОВИЯ СЪЕМА МАТЕРИАЛА И ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ АБРАЗИВНОМ ПОЛИРОВАНИИ**

*Теоретически определены условия, при которых абразивное зерно не будет перекатываться, а прочно удерживаться в инструменте-полировальнике и осуществлять процесс полирования. Расчетами установлено, что в случае моделирования абразивного зерна в форме двух конусов, которые внедряются в материал инструмента-полировальника и обрабатываемый металл, тангенциальные усилия, возникающие в материале инструмента-полировальника и обрабатываемом металле, будут приблизительно равны. Поэтому абразивные зерна с одинаковой вероятностью могут как перекатываться в зоне обработки, так и удерживаться в материале инструмента-полировальника и совершать полезную работу. Даны практические рекомендации.*

**Ключевые слова:** абразивное полирование, инструмент-полировальник, абразивные зерна, сила резания, прочность на сжатие материала, обрабатываемый материал

*Теоретично визначено умови, за яких абразивне зерно не буде перекочуватися, а утримуватися в інструменті-полірувальнику і здійснювати процес полірування. Розрахунками встановлено, що в разі моделювання абразивного зерна в формі двох конусів, які впроваджуються в матеріал інструмента-полірувальника і оброблюють метал, тангенціальні зусилля, що виникає в матеріалі інструмента-полірувальника і в оброблюваному металі, будуть приблизно рівні. Тому абразивні зерна з однаковою ймовірністю можуть як перекочуватися в зоні обробки, так і утримуватися в матеріалі інструмента-полірувальника і виконувати корисну роботу. Надано практичні рекомендації.*

**Ключові слова:** абразивне полірування, інструмент-полірувальник, абразивні зерна, сила різання, міцність на стиск матеріалу, матеріал, що оброблюється

*In theory, it defines the conditions under which the abrasive grain will not roll, and held firmly in the tool-up pad and carry out polishing process. The calculations revealed that in the case of abrasive grain simulation in the form of two cones that are embedded in the tool, polishing pad material and processed metal, tan gentsialhne forces occurring in the material and the polishing tool-treated metal will be approximately equal. Therefore, abrasive grains with equal probability may be rolled into a processing zone and be retained in the material of the polishing tool, and perform useful work. Practical recommendations.*

**Keywords:** abrasive polishing, polishing tool, the abrasive grains, cutting force, the compressive strength of the material, the material being processed

**Постановка проблемы.** Абразивное полирование является одним из основных методов финишной абразивной обработки. Условием осуществления съема металла и формообразования поверхностей при абразивном полировании следует рассматривать возможность достаточно прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника. Если материал инструмента характеризуется высокой твердостью, то, очевидно, абразивное зерно не сможет в него внедриться и удержаться в нем в процессе обработки. Оно будет перекатываться,

фактически не совершая съём обрабатываемого материала. Поэтому материал инструмента следует выбирать достаточно пластичным, обеспечивающим внедрение (шаржирование) в него абразивного зерна и удержание его с силой, достаточной для осуществления процесса микрорезания. В связи с этим в работе решается задача повышения прочности удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Физические основы и технологические возможности абразивного полирования рассмотрены в работах [1-3]. Однако в этих работах приведены в основном результаты экспериментальных исследований процесса полирования, что ограничивает возможности его дальнейшего совершенствования с точки зрения повышения производительности и качества обработки. Поэтому необходимо провести теоретический анализ условий обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника и разработать практические рекомендации для их осуществления.

**Цель работы** – обоснование условий обеспечения прочного удержания абразивных зерен в материале инструмента-полировальника для осуществления высокопроизводительного съема материала и высококачественной обработки при абразивном полировании.

**Основной материал.** Для аналитического описания процесса взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента рассмотрена расчетная схема (рис. 1), в которой под действием радиального усилия  $P_{y0}$  абразивное зерно внедряется в обрабатываемый металл на глубину  $a$  и в материал инструмента на глубину  $a_1$  [4,5].

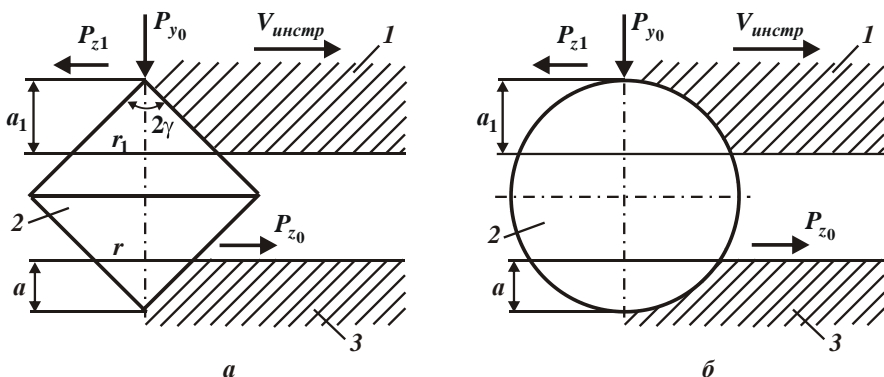


Рисунок 1 – Расчетные схемы взаимодействия абразивного зерна 2 в форме двух спаренных конусов (а) и в форме сферы (б)

с материалом инструмента-полировальника 1 и с обрабатываемым материалом 3

Для определения глубин  $a$  и  $a_1$  необходимо знать площади контакта абразивного зерна с обрабатываемым металлом  $F_{\text{конт}}$  и с материалом инструмента  $F_{\text{контл}}$ . С целью упрощения расчетов первоначально рассмотрено абразивное зерно в форме двух спаренных между собой конусов с углами при вершинах  $2\gamma$ . Тогда, исходя из рис. 1, получено

$$F_{\text{конт}} = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a^2; \quad (1)$$

$$F_{\text{контл}} = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a_1^2, \quad (2)$$

где  $r = \text{tg} \gamma \cdot a$ ;  $r_1 = \text{tg} \gamma \cdot a_1$  – радиусы площадей  $F_{\text{конт}}$  и  $F_{\text{контл}}$ , м.

Твердости обрабатываемого металла  $HV$  (по Виккерсу) и материала инструмента  $HV_1$  определяются зависимостями:

$$HV = \frac{P_{y0}}{F_{\text{конт}}} = \frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a^2}; \quad (3)$$

$$HV_1 = \frac{P_{y0}}{F_{\text{контл}}} = \frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot a_1^2}. \quad (4)$$

Решая зависимости (3) и (4) относительно глубин  $a$  и  $a_1$ , получено:

$$a = \sqrt{\frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV}}; \quad (5)$$

$$a_1 = \sqrt{\frac{P_{y0}}{\pi \cdot \text{tg}^2 \gamma \cdot HV_1}}. \quad (6)$$

Как видно, чем больше угол  $\gamma$ , твердости обрабатываемого металла  $HV$  и материала инструмента  $HV_1$ , тем меньше глубины внедрения абразивного зерна в обрабатываемый металл  $a$  и в материал инструмента  $a_1$ . Чтобы абразивное зерно глубже внедрилось в материал инструмента и прочнее в нем удерживалось в процессе обработки, необходимо уменьшать твердость материала инструмента  $HV_1$ . Это позволит увеличить тангенциальное усилие  $P_{z1}$ , с которым абразивное зерно будет удерживаться в инструменте-полировальнике. Тангенциальное усилие  $P_{z1}$  можно выразить:

$$P_{z1} = K_{\text{рез1}} \cdot P_{y0}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{рез1}}$  – коэффициент, численно равный коэффициенту резания.



Очевидно, чем больше коэффициент  $K_{рез1}$ , тем больше тангенциальное усилие  $P_{z1}$  и прочнее будет удерживаться абразивное зерно. Принимая условие  $HV_1 < HV$  с учетом зависимостей (5) и (6) получено:

$$\frac{a_1}{a} = \sqrt{\frac{HV}{HV_1}}. \quad (8)$$

Из данного соотношения вытекает условие:  $a_1 > a$ . При перемещении абразивного зерна со скоростью инструмента  $V_{инстр}$  произойдет процесс микрорезания обрабатываемого металла. Возникающая при этом тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z0}$  будет подчиняться зависимости:

$$P_{z0} = K_{рез0} \cdot P_{y0}. \quad (9)$$

Коэффициент резания  $K_{рез0}$  с физической точки зрения не должен превышать значение коэффициента  $K_{рез1}$ , входящего в зависимость (7). В противном случае будет справедливо условие  $P_{z0} > P_{z1}$ , в результате чего зерно не сможет прочно удерживаться в материале инструмента, будет перекашиваться, что исключает процесс микрорезания обрабатываемого металла. Иными словами, для осуществления процесса микрорезания обрабатываемого металла должно выполняться условие  $P_{z0} < P_{z1}$ .

Учитывая то, что абразивное зерно с одинаковой вероятностью может осуществлять процесс микрорезания как обрабатываемого металла, так и материала инструмента-полировальника, то для выполнения условия  $P_{z0} < P_{z1}$ , исходя из зависимостей (7) и (8), необходимо выполнить условие  $K_{рез0} < K_{рез1}$ . В работе [6] показано, что условное напряжение резания  $\sigma$  при микрорезании единичным зерном может быть описано зависимостью:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\operatorname{tg} \left[ 45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2} \right]} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез}}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого металла, Н/м<sup>2</sup>;  
 $\psi$  – условный угол трения передней поверхности режущего зерна с металлом ( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения);  $\gamma$  – условный передний угол зерна.

Из зависимости (10) следует, что чем больше углы  $\psi$  и  $\gamma$ , тем больше условное напряжение резания  $\sigma$ . Это согласуется с практикой абразивной обработки, согласно которой образование площадок износа на абразивных зернах ( $2\gamma \rightarrow 180^0$ ) позволяет уменьшить шероховатость поверхности (обеспечивает сглаживание микронеровностей на обрабатываемой поверхности) за счет увеличения условного напряжения резания  $\sigma$  при полировании с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ .

С другой стороны, чтобы снизить силовую напряженность процесса и повысить производительность обработки, наоборот, необходимо условное напряжение резания  $\sigma$  уменьшать, уменьшая углы  $\psi$  и  $\gamma$ . Следовательно, имеют место противоположные требования к параметру  $\sigma$  в зависимости от решаемой задачи: обеспечение уменьшения шероховатости поверхности или повышение производительности обработки. С целью уменьшения шероховатости поверхности параметр  $\sigma$  необходимо увеличивать, а с целью повышения производительности обработки, наоборот, уменьшать за счет обеспечения высокой остроты режущих зерен и снижения интенсивности трения в зоне резания. Очевидно, увеличение параметра  $\sigma$  предполагает увеличение тангенциальной составляющей силы резания  $P_{z0}$  и поэтому для выполнения условия  $P_{z0} < P_{z1}$  (соответственно условия  $K_{pez0} < K_{pez1}$ ) требуется увеличивать силу  $P_{z1}$ , повышая прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника.

Для анализа условия  $K_{pez0} < K_{pez1}$  следует разрешить зависимость (10) относительно коэффициента резания  $K_{pez}$ . В результате получено:

$$K_{pez} = 2 \cdot \operatorname{tg} \left[ 45^0 - \frac{(\psi + \gamma)}{2} \right]. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные по зависимости (11) значения  $K_{pez}$ .

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициента резания  $K_{pez}$

$(\psi + \gamma)$ , град	30	45	60	70	90
$K_{pez}$	0,577	0,424	0,268	0,184	0

Применительно к процессам микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, коэффициенты резания  $K_{pez0}$  и  $K_{pez1}$  аналитически опишутся:

$$K_{рез0} = 2 \cdot \operatorname{tg} \left[ 45^0 - \frac{(\psi_0 + \gamma)}{2} \right]; \quad (12)$$

$$K_{рез1} = 2 \cdot \operatorname{tg} \left[ 45^0 - \frac{(\psi_1 + \gamma)}{2} \right], \quad (13)$$

где  $\psi_0, \psi_1$  – условные углы трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника.

Очевидно, для того чтобы выполнить условие  $K_{рез0} < K_{рез1}$ , необходимо чтобы угол  $\psi_0$  был больше угла  $\psi_1$ . С учетом соотношений  $\operatorname{tg} \psi_0 = f_0$ ;  $\operatorname{tg} \psi_1 = f_1$  (где  $f_0, f_1$  – соответственно коэффициенты трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника) должно выполняться условие  $f_0 > f_1$ . Однако, обеспечить выполнение данного условия сложно, поэтому одновременно будут происходить процессы микрорезания абразивным зерном обрабатываемого металла и материала инструмента-полировальника, т.е. фактически с одинаковой интенсивностью будет изнашиваться инструмент и производиться съем обрабатываемого металла.

В реальных условиях процесс абразивного полирования осуществляется зернами, имеющими геометрическую форму, близкую к сфере. Поэтому рассмотрены закономерности взаимодействия зерна в форме сферы с обрабатываемым металлом и материалом инструмента-полировальника при условии, что на зерно при полировании действует радиальное усилие  $P_{y0}$  (рис. 1). В работе [6] установлено, что условное напряжение резания  $\sigma$  и коэффициент резания  $K_{рез}$  применительно к процессу микрорезания зерном в форме сферы описываются:

$$\sigma = \frac{\sigma_{сж}}{\left( \sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi_0}{2} \right)} = \frac{2 \cdot \sigma_{сж}}{K_{рез0}}; \quad (14)$$

$$K_{рез0} = 2 \cdot \left( \sqrt{\frac{a}{2R}} - \operatorname{tg} \frac{\psi_0}{2} \right), \quad (15)$$

где  $a$  – толщина среза, м;  $R$  – радиус абразивного зерна, м.

При таком представлении процесса микрорезания условное напряжение резания  $\sigma$  тем меньше, чем больше отношение  $a/R$  и меньше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым

металлом  $\psi_0$ . Коэффициент резания  $K_{рез}$ , наоборот, тем меньше, чем меньше  $a/R$  и больше условный угол трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом  $\psi_0$ . Зависимости (14) и (15) справедливы при микрорезании обрабатываемого металла. При микрорезании материала инструмента-полировальника зависимость (15) примет вид:

$$K_{рез1} = 2 \cdot \left( \sqrt{\frac{a}{2R}} - tg \frac{\psi_1}{2} \right). \quad (16)$$

Как видно, зависимости (15) и (16) отличаются условными углами трения  $\psi_0$  и  $\psi_1$ , поскольку коэффициенты трения передней поверхности режущего зерна с обрабатываемым металлом  $f_0$  и материалом инструмента-полировальника  $f_1$  различны. Для того чтобы выполнялось условие  $K_{рез0} < K_{рез1}$  необходимо выполнить условие  $f_0 > f_1$ . Это соответствует приведенному выше решению, полученному при моделировании абразивного зерна в форме двух спаренных между собой конусов (рис. 1,а).

Из зависимостей (15) и (16) вытекает важный вывод, связанный с тем, что чем больше отношение  $a/R$ , тем больше коэффициент резания. Учитывая то, что глубина внедрения абразивного зерна в материал инструмента-полировальника больше глубины внедрения зерна в обрабатываемый металл, то, очевидно, выполняется условие  $K_{рез0} < K_{рез1}$ . Из этого вытекает, что при микрорезании абразивным зерном в форме сферы будет гарантированно выполняться условие  $P_{z0} < P_{z1}$ , а это обеспечит достаточно прочное удержание зерна в инструменте-полировальнике и позволит осуществить процесс съема обрабатываемого металла.

**Выводы.** В работе теоретически определены условия, при которых абразивное зерно не будет перекатываться в зоне обработки, а прочно удерживаться в материале инструмента-полировальника и осуществлять процесс резания и съема металла с обрабатываемой поверхности. Расчетами установлено, что в случае моделирования абразивного зерна в форме двух конусов, которые внедряются в материал инструмента-полировальника и обрабатываемый металл, тангенциальные усилия, возникающие в материале инструмента-полировальника и обрабатываемом металле, будут приблизительно равны. Поэтому абразивные зерна с одинаковой вероятностью могут как перекатываться в зоне обработки, так и удерживаться в материале инструмента-полировальника и совершать полезную работу. При моделировании абразивного зерна в форме сферы за счет особенностей процесса резания (стружкообразования) тангенциальное усилие, возникающее в обрабатываемом металле, будет меньше тангенциального

усилия, возникающего в материале инструмента-полировальника. Поэтому в данном случае вероятность удержания зерна в инструменте выше и выше эффективность процесса абразивного полирования. При этом доказано, что прочность удержания абразивного зерна в материале инструмента-полировальника зависит от отношения твердости и прочности на сжатие материала. Это позволяет научно обоснованно подойти к выбору необходимого материала инструмента-полировальника.

**Список использованных источников:** 1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 2. Шубников А.В. Элементарные механические явления при шлифовании и полировании / А.В. Шубников // Качество поверхности деталей машин. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – №3. – С. 32-35. 3. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с. 4. Шкурупий В.Г. Изучение механизма формирования поверхности при обработке резанием // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Вип. 5. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2010. – С. 114-121. 5. Шкурупий В.Г. Исследование процесса полирования свободным абразивом / В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2016. – № 5 (1177). – С. 87-89. 6. Андiлахай А.А. Научные основы эффективной отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук : спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / А.А. Андiлахай. – Одесса, 2013. – 47 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravochnik / Pod red. prof. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s. 2. Shubnikov A.V. Elementarnye mekhanicheskie yavleniya pri shlifovanii i polirovanii / A. V. Shubnikov // Kachestvo poverkhnosti detaley machin. – M.: Izd. AN SSSR, 1957. – №3. – S. 32-35. 3. Kachestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilyitskiy, I.K. Thepovetskiy. – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 s. 4. Novikov F.V. Osnovy obrobki metalovich vrobiv z optichnymi vlastivostyami : monografiya / F.V. Novikov, V. G. Shkurupiy. – Kharkiv: KhNEU im. S. Kuznetsya, 2015. – 388 s. 5. Shkurupiy V. G. Issledovanie protsesssa polirovaniya svobodnym abrazivom / V.G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KPI”. Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Tekhnologii v machinobuduvanni. – Kharkiv: NTU “KPI”, 2016. – № 5(1177). – S. 87-89. 6. Andilakhay A.A. Nauthnye osnovy effektivnoy odelothnoy abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami: avtoref. diss. ... dokt. tekhn. nauk : spets. 05.02.08 “ Tekhnologii machinostroeniya.” / A.A. Andilakhay. – Odessa, 2013. – 47 s.

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>Бабич Ю.И., Бабич Н.И., Якимов А.А., Бовнегра Л.В.</b> Модель поиска причинно-следственных сигналов на изображениях .....	3
<b>Голофеева М.А., Левинский А.С., Тонконогий В.М.</b> Повышение точности измерения температуры с помощью приборов инфракрасной техники.....	14
<b>Гусарев В.С.</b> Технологические объекты в ГПС.....	19
<b>Доброскок В.Л., Погарский А.В.</b> Прогнозирование остаточных деформаций изделий, изготавливаемых селективным лазерным спеканием.....	26
<b>Кальченко В.І., Кальченко В.В., Следнікова О.С.</b> 3D-модельовання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при двосторонньому торцевому шліфуванні некруглих деталей орієнтованими кругами.....	31
<b>Коновалов И.П., Кремнев Г.П., Наддачин В.Б.</b> Опыт компьютерного проектирования процесса получения заготовок из листового проката.....	40
<b>Кравченко Ю.Г., Крюкова Н.В.</b> Елементні показники процесу точіння загартованої сталі пластинами із ПКНБ.....	43
<b>Лиценко Н.В., Ларишин В.П., Нежебовский В.В.</b> Оптимизация профильного зубошлифования на станке с ЧПУ и системой измерения припуска .....	50
<b>Мицык А.В., Федорович В.А.</b> Возможности мультиэнергетической технологии отделочно-зачистной обработки и гибридного станка вибрационного и двойного центробежного динамического воздействия.....	62
<b>Пижов І.М., Клименко В.Г.</b> Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя .....	69
<b>Рябенков И.А.</b> Обоснование технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом .....	81
<b>Ступницький В.В., Ступницька Н.В.</b> Методологія проектування об'єктно-орієнтованих та функціонально-орієнтованих технологічних процесів машинобудівного виробництва.....	91
<b>Тігарєв В.М., Тонконогий В.М., Якімов О.О.</b> Розробка програмного модулю для управління тривимірною моделлю рами спортивного автомобіля при автоматизованому проектуванні.....	100

<b>Тонконогий В.М., Якимов А.А., Синько И.С.</b> Компьютерная модель проектирования помещений с акустическими свойствами .....	111
<b>Шейкін С.Є., Студенець С.Ф., Мельниченко В.В., Мельниченко Я.В.</b> Технологія відновлення карданих валів з застосуванням градієнтного деформаційного зміцнення.....	118
<b>Шкурупий В.Г.</b> Условия съема материала и формообразования поверхностей при абразивном полировании .....	126

Наукове видання

**Високі технології в машинобудуванні**

Збірник наукових праць

Упорядник *проф. Грабченко А. І.*

Оригінал-макет *Крюкова Н.В.*

В авторській редакції

Підп. до друку                      Формат 60x84 1/16. Папір Сору Paper.  
Друк - ризографія. Гарнитура Таймс. Умов.друк.арк. 10,0.  
Облік.вид.арк. 11,0. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 1149  
Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХП»  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---