

УДК 621.923

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

И. В. Гершиков

Генеральный директор

ЗАО "Азовский машиностроительный завод"

ул. Гагарина, 7, г. Бердянск,

Запорожская область, Украина, 71111

Контактный тел.: (06153) 45-97-9

E-mail: direktor@amz.com.ua

*У роботі визначені умови зменшення температури при механічній обробці, які полягають в зменшенні енергоємності обробки за рахунок зниження інтенсивності тертя в зоні різання*

*Ключові слова: механічна обробка, шліфування, температура шліфування*

*В работе определены условия уменьшения температуры при механической обработке, состоящие в уменьшении энергоёмкости обработки за счет снижения интенсивности трения в зоне резания*

*Ключевые слова: механическая обработка, шлифование, температура шлифования*

*This paper defines the conditions to reduce the temperature in the machining, consisting in reducing the energy intensity of processing due to reduction in intensity of friction in the cutting zone*

*Keywords: machining, grinding, temperature followed-fovaniya*

## 1. Введение

Исследования, о которых идет речь в статье, относятся к области технологии машиностроения. При изготовлении ответственных деталей машин из материалов с повышенными физико-механическими свойствами постоянно возникают проблемы их высококачественной обработки, поскольку применяемые традиционные методы механической обработки в силу их высокой теплонапряженности, как правило, приводят к появлению на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов. В настоящее время сформировалось достаточно полное представление о технологических возможностях процесса шлифования и лезвийной обработки в плане повышения качества и производительности. Разработаны нормативы режимов резания, позволяющие научно обоснованно выбирать оптимальные характеристики режущих инструментов и параметры режимов резания. Разработаны теоретические основы резания и шлифования материалов, в которых раскрыты технологические закономерности формирования параметров качества обработки. Вместе с тем, все возрастающие требования к качеству обработки деталей машин и производительности предопределяют поиск новых более перспективных направлений повышения эффективности механической обработки, обеспечивающих в первую очередь снижение теплонапряженности процесса и температуры резания на основе уменьшения энергоёмкости обработки.

## 2. Постановка проблемы

Для установления условий повышения качества и производительности обработки важно с единых позиций провести теоретический анализ закономерностей изменения температуры резания и энергоёмкости обработки и на основе сравнения различных вариантов механической обработки (включая процессы шлифования и резания лезвийными инструментами) по температурному критерию выбрать наиболее эффективный вариант. Исследования проводились в рамках тематического плана работ ЗАО "Азовский машиностроительный завод".

## 3. Анализ последних достижений и публикаций

В работах [1-3] приведены математические модели определения температурных полей, возникающих в поверхностном слое обрабатываемой детали в процессе резания, что позволяет произвести расчет температуры резания, установить условия ее уменьшения и научно обоснованно подойти к выбору оптимальных параметров режимов резания и характеристик инструмента. Вместе с тем, данные решения требуют сложных численных расчетов, причем, отдельно для процессов шлифования и резания лезвийными инструментами, что отчасти лишает преимуществ аналитического подхода по сравнению с традиционно применяемыми экспериментальными подходами. Фактически невозможно с единых позиций теоретически оценить технологические возможности различных методов механи-

ческой обработки с точки зрения обеспечения качества и производительности обработки по температурному критерию.

В работах [4, 5] приведены важные теоретические решения об определении температуры резания, позволяющие на основе достаточно простых аналитических зависимостей обосновать условия ее уменьшения и произвести расчет оптимальных параметров режимов резания и характеристик инструментов. Это открывает новые возможности повышения эффективности механической обработки. Поэтому настоящая статья посвящена дальнейшим исследованиям в данном направлении, установлению более общих решений по определению оптимальных условий механической обработки с учетом ограничения по температуре резания.

#### 4. Цель работы

Обоснование условий уменьшения энергоемкости и температуры при шлифовании и резании лезвийными инструментами.

#### 5. Результаты исследований

Проведем теоретический анализ температуры шлифования  $\theta$  на основе аналитической зависимости, приведенной в работе [5]:

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho_m} \cdot z, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);  $\rho_m$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – относительная величина температуры при шлифовании, изменяющаяся в пределах 0...1 и определяемая из уравнения

$$\frac{c \cdot \rho_m}{\lambda} \cdot t \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\frac{t \cdot \rho}{2}} = -\ln(1-z) - z; \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град);  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$ ;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м.

Как видно, с увеличением  $z$  температура шлифования  $\theta$  непрерывно увеличивается. В свою очередь, относительная величина температуры  $z$  с увеличением параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{дет}$  также увеличивается. Следовательно, увеличение  $t$  и  $V_{дет}$  ведет к увеличению температуры шлифования  $\theta$ , асимптотически приближая ее к максимально возможному значению  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho_m)$ . Графически зависимость температуры шлифования  $\theta$  от параметров  $t$  и  $V_{дет}$  показана на рис. 1 [5]. Аналогичные зависимости установлены экспериментально при микрорезании единичными абразивными и алмазными зернами, а также при резании лезвийными инструментами, что свидетельствует о достоверности полученной зависимости (1).

Из зависимости (1) вытекает, что температура шлифования  $\theta$ , с одной стороны, определяется условным напряжением резания  $\sigma$ , а с другой стороны, – относи-

тельной величиной температуры  $z$ . Очевидно, условное напряжение резания  $\sigma$  зависит от режущей способности шлифовального круга, а  $z$  – главным образом, от параметров режима шлифования и соответственно производительности обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ , где  $B$  – ширина шлифования, м. Расчетами установлено, что относительная величина температуры  $z$  для применяемых на практике режимов шлифования (включая многопроходное и глубинное шлифование различных по физико-механическим свойствам обрабатываемых материалов) изменяется незначительно: в пределах 0...0,5. Причем, для традиционных процессов многопроходного шлифования, как правило, в пределах 0...0,1. Это свидетельствует о том, что в связи с наличием безразмерной величины  $z$  в зависимости (1), температура шлифования  $\theta$  принимает относительно небольшие значения – приблизительно в 10 раз меньше максимально возможной температуры шлифования  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho_m)$ , которая в свою очередь может принимать весьма большие значения – в несколько тысяч градусов. Следовательно, наличие безразмерной величины  $z$  в зависимости (1), по сути, приводит в соответствие теорию и практику шлифования и как бы ограничивает чрезмерное увеличение температуры шлифования  $\theta$ . Это согласуется с экспериментальными данными, т.к. при шлифовании кругами с высокой режущей способностью отсутствуют прижоги и другие температурные дефекты на обрабатываемых поверхностях фактически во всем возможном диапазоне изменения параметров режимов шлифования. В других случаях, наоборот, прижоги на обрабатываемых поверхностях начинают появляться при небольшой производительности обработки, что связано как с увеличением условного напряжения резания  $\sigma$  (вследствие низкой режущей способности круга и интенсивного трения в зоне резания), так и склонностью к образованию прижогов отдельных обрабатываемых материалов. В общем, несомненно, основной причиной увеличения температуры шлифования  $\theta$  и образования прижогов на обрабатываемых поверхностях является увеличение условного напряжения резания  $\sigma$ , что требует применения других более эффективных шлифовальных кругов и смазочно-охлаждающих жидкостей, снижающих интенсивность трения в зоне резания.

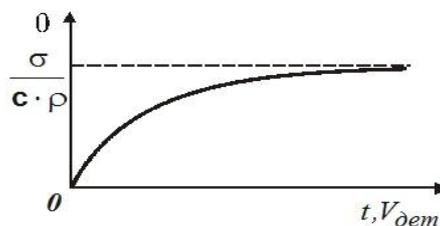


Рис. 1. Зависимость температуры шлифования  $\theta$  от параметров  $t$  и  $V_{дет}$

Для наглядности произведем расчет температуры шлифования  $\theta$  по зависимости (1) для условия  $z = 1$  применительно к шлифованию твердых сплавов. Экспериментально установлено, что в данном случае  $\sigma$  может изменяться в чрезвычайно широких пределах –  $10^4 \dots 10^6$  Н/мм<sup>2</sup>. Тогда с учетом теплофизических характеристик твердого сплава ВК6 ( $c = 175,9$  Дж/(кг·К);  $\rho_m = 15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), имеем  $\theta = 3,5 \cdot 10^3 \dots 376 \cdot 10^3$  К. Как вид-

но, максимально возможная температура шлифования  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho_m)$  может многократно превышать температуру плавления материала (или компонентов сплава). Поэтому даже чрезмерное уменьшение относительной величиной температуры  $z$ , исходя из зависимости (1), не может обеспечить уменьшение  $\theta$  до приемлемого значения.

В связи с этим, как отмечалось выше, наиболее эффективным путем уменьшения температуры шлифования  $\theta$  по зависимости (1) является уменьшение условного на пряже ния резания  $\sigma$ . Это достигается, прежде всего, снижением интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом, которое по данным разных источников составляет до 90% энергоемкости процесса шлифования. Этим, собственно, объясняется тот факт, что энергоемкость лезвийной обработки, где отсутствует такой мощный источник трения в зоне резания как связка шлифовального круга, во много раз меньше энергоемкости процесса шлифования. Поэтому применение лезвийных инструментов, в особенности алмазных, характеризующихся низким коэффициентом трения с обрабатываемым материалом, позволяет существенно повысить производительность обработки при одновременном обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей за счет снижения температуры резания. Как показано в работе [5], в данном случае в отличие от процесса шлифования, относительная величина температуры  $z \rightarrow 1$  и температура шлифования  $\theta$  принимает максимально возможное значение  $\theta = \sigma / (c \cdot \rho_m)$ . За счет увеличения  $z \rightarrow 1$  производительность обработки также принимает максимально возможное значение. Однако, при этом параметр  $\sigma$  намного меньше, чем при шлифовании. В связи с этим, температура шлифования  $\theta$ , рассчитанная по зависимости (1), меньше температуры плавления обрабатываемого материала и поэтому на обрабатываемых поверхностях не образуются температурные дефекты.

Необходимо отметить, что энергоемкость обработки и условное напряжение резания  $\sigma$  по физической сути одна и та же величина, определяемая отношением мощности резания к производительности обработки. Поэтому уменьшение энергоемкости обработки соответствует уменьшению параметра  $\sigma$  в зависимости (1) и, следовательно, уменьшению температуры шлифования  $\theta$ .

Снизить интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом можно за счет обеспечения увеличенного выступления зерен в круге, что достигается, во-первых, поддержанием высокой режущей способности круга путем применения непрерывной или периодической правки круга, обеспечивающей своевременное удаление с рабочей поверхности круга затупившихся зерен. Во-вторых, применением крупнозернистых высокопористых абразивных кругов, обеспечивающих свободную вместимость образующихся стружек и других продуктов обработки в межзеренном пространстве круга даже в условиях высокопроизводительного глубинного шлифования. В-третьих, применением шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Установлено [1], что в этом случае уменьшаются силы и температура шлифования, исключается образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях. Эффект обработки

достигается главным образом за счет ударно-циклического характера взаимодействия круга с деталью, в результате чего происходит своего рода постоянная правка рабочих выступов круга, что снижает энергоемкость обработки (параметр  $\sigma$ ) и повышает качество обрабатываемых поверхностей. С другой стороны, периодическое прерывание процесса шлифования способствует хотя бы частичному охлаждению детали и таким образом дополнительно снижает температуру шлифования. Экспериментально установлено, что энергоемкость обработки при этом значительно ниже энергоемкости шлифования обычным кругом со сплошной режущей поверхностью.

Важным резервом уменьшения энергоемкости обработки (параметра  $\sigma$ ) следует рассматривать применение алмазных кругов, обладающих повышенной твердостью и остротой режущих кромок и обеспечивающих увеличение стойкости. Алмазные круги на органических и керамических связках, как правило, работают в режиме самозатачивания и характеризуются высокой режущей способностью вплоть до их полного износа. При этом доля трения связки алмазного круга в общей энергоемкости процесса шлифования относительно небольшая, что приводит к уменьшению параметра  $\sigma$  и соответственно температуры шлифования.

Значительными технологическими возможностями в плане снижения энергоемкости обработки располагают алмазные круги на металлических связках, работающие в режиме непрерывной или периодической электроэрозионной или электрохимической правки [6]. Благодаря электроэрозионному (термическому) воздействию на металлическую связку алмазного круга, происходит непрерывное восстановление режущих свойств круга и на его рабочей поверхности поддерживается развитый режущий рельеф. В контакте с обрабатываемым материалом находятся в основном режущие зерна, интенсивность трения связки круга с обрабатываемым материалом незначительна в связи с увеличенным выступанием алмазных зерен. Установлено, что чем интенсивнее электроэрозионное воздействие на алмазный круг в процессе его правки, тем значительнее выступание алмазных зерен и тем меньше энергоемкость обработки и температура шлифования. Таким образом показано, что в настоящее время имеется целый арсенал эффективных способов снижения трения в зоне резания при шлифовании, что несомненно является важным фактором уменьшения энергоемкости обработки (параметра  $\sigma$ ) и в соответствии с зависимостью (1) – уменьшения температуры шлифования  $\theta$ .

## 6. Выводы

На основе аналитических зависимостей проведен теоретический системный анализ условий уменьшения температуры при механической обработке и показано, что наиболее перспективным в этом направлении является уменьшение энергоемкости обработки за счет снижения интенсивности трения в зоне резания. Установлено, что возможности уменьшения температуры резания (шлифования) за счет изменения режимов резания значительно ниже. Показано, что важнейшим условием уменьшения энергоемкости шлифования яв-

ляется выбор оптимальных характеристик круга в каждом конкретном случае обработки, обеспечиваю-

щих снижение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

### Литература

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие [Текст] / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Новиков Ф.В. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию [Текст] / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСГ, вип. 61, 2007. – С. 164-171.
6. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник [Текст] / За редакцією А.І. Грабченко – Х.: ХДПУ, 1999. – 436 с.

*Приведені результати досліджень основних характеристик тягової системи електромобіля (ЕМ) із застосуванням суперконденсаторів (СК) на етапах старту та розгону, подальшого енергоживлення від акумуляторної батареї (АКБ)*

*Ключові слова: акумуляторна батарея, суперконденсатор, електромобіль, потужність*

*Приведены результаты исследований основных характеристик тяговой системы электромобиля (ЭМ) с применением суперконденсаторов (СК) на этапах старта и разгона, последующего энергопитания от аккумуляторной батареи (АКБ)*

*Ключевые слова: аккумуляторная батарея, суперконденсатор, электромобиль, мощность*

*The results of investigations of the main characteristics of the traction system of the electric motorcar (EM) with application of supercapacitors (SC) at the stage of EM starting, acceleration and subsequent accumulator battery (AB) energy supply are given*

*Keywords: accumulator battery, supercapacitor, electric motorcar*

УДК 629.113.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АКБ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

**Н.И. Слипченко**

Доктор физико-математических наук, профессор\*  
Контактный тел. (0572) 702-10-20

**В.А. Письменецкий**

Кандидат технических наук, профессор\*  
Контактный тел. (0572) 702-13-43

**М.Ю. Гуртовой**

Аспирант  
Контактный тел. (0572) 702-13-43

\*Кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств

Харьковский национальный университет радиозлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

### Введение

В настоящее время в связи с непрерывным ростом цен на нефть и продукты нефтепереработки в мире возросла популярность электромобилей. Спросу на этот вид транспорта способствует и то, что в условиях города

современный автомобиль реализует от 5 кВт до 20 кВт мощности двигателя. Поэтому городской автотранспорт целесообразно заменить на электромобили. Эксперты также утверждают, что при переходе на электромобили уровень выбросов углекислого газа снизится в США с 198 до 167 г/км и в Японии с 180 до 140 г/км [1].