

УДК 655.3.021

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПИРОМЕТРОВ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ**©Гордеев А. С.¹, Лаппо И. Н.²*Українська інженерно-педагогічна академія¹**Красноармійський індустріальний інститут ДВНЗ «ДонНТУ»²***Інформація про авторів:**

Гордеев Андрій Сергійович: ORCID: 0000-0001-6521-3937; gordeew@ukr.net; доктор технічних наук; завідувач кафедри поліграфічного виробництва і комп'ютерної графіки; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Лаппо Ірина Миколаївна: ORCID: 0000-0001-9243-9763; spinpex@i.ua; асистент кафедри інженерної механіки; Красноармійський індустріальний інститут Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет»; вул. Шибанкова, 2, м. Красноармійськ, 85300, Україна.

Целью работы является сопоставление теплового баланса в зоне резания, оптимальной температуры обрабатываемости и настроек пирометра для адекватного отображения снимаемой информации.

Проведенный анализ литературных источников показал. Современный автоматизированный физический эксперимент должен обеспечивать не только снятие показаний с датчиков, но и управление процессом эксперимента, их анализ, обработку и визуальную интерпретацию в удобной экспериментатору форме.

В результате исследований влияния температуры на свойства материалов, было установлено, что температура, при которой физико-механические характеристики имеют экстремальные значения, с достаточной точностью соответствуют температуре максимальной обрабатываемости материала.

Пирометрическое измерение температуры в зоне резания позволяет значительно повысить эффективность обработки, т.е. установить более жесткие режимы обработки, при этом, не опасаясь того, что произойдет перегрев обрабатываемого материала.

Ключевые слова: пирометр; отверстия; резание; температура; обрабатываемость.

Гордеев А. С., Лаппо И. М. «Теплофізичні аспекти застосування пірометрів при дослідженні процесів обробки отворів».

Метою роботи є зіставлення теплового балансу в зоні різання, оптимальної температури оброблюваності і налаштувань пірометра для адекватного відображення інформації.

Проведений аналіз літературних джерел показав. Сучасний автоматизований фізичний експеримент повинен забезпечувати не тільки зняття показань з датчиків, а й управління процесом експерименту, їх аналіз, обробку та візуальну інтерпретацію в зручній експериментатору формі.

В результаті досліджень впливу температури на властивості матеріалів, було встановлено, що температура, при якій фізико-механічні характеристики мають екстремальні значення, з достатньою точністю відповідають температурі максимальної оброблюваності матеріалу.

Пірометричної вимірювання температури в зоні різання дозволяє значно підвищити ефективність обробки, тобто встановити більш жорсткі режими обробки, при цьому, не побоюючись того, що станеться перегрів оброблюваного матеріалу.

Ключові слова: пірометр; отвори; різання; температура; оброблюваність.

Hordeev A., Lappo I. “Thermophysical aspects of the use of the pyrometer in study of the hole machining”.

The aim of the work is to compare the thermal balance in the cutting zone, the optimum temperature workability and setting pyrometer for adequate display of removable media.

The analysis of the literature showed. Modern automated physical experiment should provide not only the readings from sensors and process control experiment, analysis, processing and visualization of the experimenter in a convenient form.

As a result of studies of the effect of temperature on the properties of the materials, it was found that the temperature at which the physical and mechanical characteristics are extremal values with sufficient accuracy to meet the maximum temperature of the workability of the material.

Pyrometric temperature measurement in the cutting zone can dramatically enhance the effectiveness of the treatment, i.e. establish more stringent treatment regimens, while not being afraid of what will happen to overheat the material being processed.

Keywords: pyrometer; holes; cutting; temperature; workability.

1. Введение

Современная промышленность предлагает исследователю широкий спектр измерительных установок, комплексов и приборов для решения задач автоматизации научных исследований. Начиная с первых калориметрических опытов Н. Н. Саввина и Г. Фридриха в 1910–1911 гг. и вплоть до 50-х годов XX века тепловые явления в процессе резания изучали только экспериментальными методами [1]. В 1914 г. Я. Г. Усачев первым разработал метод непосредственного измерения температур искусственной и полусинтетической термопарами. В одном и том же 1925 г. независимо друг от друга англичанин Э. Г. Герберт, немец К. Готвайн и американец Г. Шор предложили использовать для измерения температуры резания естественную термопару «резец–деталь». Немецкий ученый Ф. Шверд в 1933 г. разработал радиационный метод измерения температуры.

В США значительный вклад в экспериментальные исследования теплофизики резания в 1930–40-е годы внесли О. Бостон и У. Гильберт. В 1948–49 гг. профессор Иллинойского университета К. Триггер методом естественной термопары измерил температуры при различных режимах работы твердосплавных резцов. В СССР в этот период значительный вклад в развитие эмпирических методов исследования температур внесли И. М. Беспрозванный, Н. И. Резников, А. М. Даниэлян, М. В. Касьян и др. [1].

Одной из первых попыток аналитического определения температур в контакте двух тел была попытка сотрудников Кембриджского университета Ф. Боудена и К. Ридлера. В 1935 г. они выполнили расчет контактной температуры, возникающей при скольжении цилиндра по поверхности полуограниченного тела.

В СССР «пионером» аналитического исследования теплообмена при резании стал в 1940 г. М. П. Левицкий. Он исключил из рассмотрения теплоту, поступающую в обрабатываемый материал, полагая, что в теплообмене участвуют только резец и стружка. Источниками теплообразования Левицкий считал работу деформации и работу трения стружки о переднюю поверхность резца.

Только после этого американские ученые Триггер и Б. Ц. Чао провели достаточно обширные аналитические исследования температур на поверхностях контакта инструмента со стружкой и с обрабатываемым материалом [2], постепенно совершенствуя подходы к расчетам. Исследователи учитывали два источника тепловыделения (пластический сдвиг и трение стружки по передней поверхности резца), пренебрегая теплотой трения на задней поверхности инструмента.

Для определения теплового потока, входящего в инструмент, Чао и Триггер использовали метод электромоделирования, предложенный в 1955 г. Жаком Боневилем и основанный на аналогии в распространении теплового потока и электрического тока.

Наиболее всесторонние и глубокие исследования теплофизики резания выполнил А. Н. Резников. С начала 1950-х гг. А. Н. Резников развивал и дополнял теорию быстро движущихся источников теплоты, разработанную П. А. Рыкалиным применительно к сварочным процессам и О. В. Егером в приложении к процессу трения.

В настоящее время широкое применение находят пирометры. Под термином «пирометр» подразумевались приборы для измерения температуры визуально, по цвету и яркости раскаленного объекта. Развитие современных пирометров началось с середины 60-х годов прошлого столетия и продолжается до сих пор. Именно в это время были сделаны важнейшие физические открытия, позволившие начать производство промышленных пирометров с высокими потребительскими характеристиками и малыми габаритными размерами. Первый портативный пирометр был разработан и произведен американской компанией Wahl в 1967 году. Пирометр был основан на принципе построения сравнительных параллелей, когда вывод о температуре тела производился на основе данных инфракрасного приемника, определяющего количество излучаемой телом тепловой энергии.

Современный автоматизированный физический эксперимент должен обеспечивать не только снятие показаний с датчиков, но и управление процессом эксперимента, запись данных в цифровой форме на управляющий компьютер, их анализ, обработку и визуальную интерпретацию в удобной экспериментатору форме.

Сказанное является особенно актуальным для теплофизического эксперимента, т.к. несмотря на большое количество методов, устройств, приборов, автоматизированных комплексов, постоянно возникают новые проблемы, решение которых не всегда возможно имеющимися средствами.

Целью работы является сопоставление теплового баланса в зоне резания, оптимальной температуры обрабатываемости и настроек пирометра для адекватного отображения снимаемой информации.

2. Разработка модели теплового баланса в зоне резания при обработке отверстий двухступенчатым осевым инструментом

Формирование теплового баланса термодинамической системы инструмент – стружка – деталь – окружающая среда при обработке отверстий представляет собой сложный механизм взаимодействия теплофизических и физико-механических процессов, связанных с поступлением, распределением и отводом тепла.

Технологія машинобудування

Для чистовой обработки отверстий осевым инструментом характерны достаточно низкие температуры в зоне резания (до 100 °С при развертывании и до 300 °С при зенкерованиях). Поэтому с известной долей допущения для исследования взаимного влияния тепловых источников при работе комбинированного инструмента можно использовать принцип суперпозиции, так как в этом интервале температур ($0 \leq \Theta \leq 300^\circ\text{C}$) теплофизические свойства обрабатываемых инструментальных материалов меняются незначительно и ими можно пренебречь.

Для разработки математической модели теплового баланса в зоне резания при обработке отверстий двухступенчатым осевым инструментом исследовалось влияние различных факторов на расчетное значение [3]. Физический смысл аналитической теории теплопроводности заключается в том, что дифференциальное уравнение Фурье связывает пространственное распределение температуры с изменением ее во времени. В цилиндрической системе координат уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + \frac{q_B}{c\rho}, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³;

c – массовая теплоемкость, Дж/кг·°С;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С;

$\frac{\lambda}{\rho c} = \omega$ – коэффициент температуропроводности вещества, м²/с;

q_B – объемная плотность тепловыделения внутренних источников, Вт/м³;

$\Theta = f(x, y, z, t)$ – температура твердого тела, имеющая координаты в разные моменты времени.

Уравнение распространения тепла непрерывно движущегося источника постоянной мощности, которое перемещается с постоянной скоростью и отнесено к неподвижной системе координат, выражено в форме интеграла. Для удобства описания температурного поля уместно применить систему координат, связанную с движущимся источником, то есть перейти к новым координатам

$$z_i = z - V_n t, \quad r_i = r, \quad R_i^2 = r_i^2. \quad (2)$$

После подстановки и элементарных преобразований подынтегральной функции уравнение процесса распространения тепла подвижного точечного источника будет иметь вид

$$\Theta(r, z, t) = \frac{q_1}{4\sqrt{\pi} \cdot \lambda \cdot R} \exp \left(-\frac{V_n R}{2\omega} - \frac{V_n (z - V_n t)}{2\omega} \right). \quad (3)$$

Данное решение позволяет определять температуру в любой точке двухмерного пространства с координатами r и z в момент времени t для мгновенного точечного источника, движущегося со скоростью V_n , в точке с координатами r_u, z_u . Исходя из уравнения (3) можно утверждать, что за движущимся тепловым источником температура постоянна, а перед ним температура уменьшается по экспоненциальному закону, тем более, чем больше скорость резания.

3. Определение температуры максимальной обрабатываемости материалов

Проведенный анализ литературных источников показал, что обрабатываемость материалов увеличивается с понижением пластичности и прочности. Учитывая, что прочность материала монотонно убывает с увеличением температуры, а характеристики пластичности имеют минимум при определенной температуре, была выдвинута гипотеза, что данная температура соответствует температуре максимальной обрабатываемости материала.

Было проанализировано изменение физико-механических характеристик обрабатываемых материалов (δ – относительное удлинение, ψ – относительное сужение, α – коэффициент линейного расширения, C – удельная теплоемкость материала, λ – коэффициент теплопроводности) в зависимости от температуры с целью определения температуры максимальной обрабатываемости материала.

В процессе работы была выявлена хорошая корреляция температуры экстремальных значений пластичности с другими механическими и физическими характеристиками обрабатываемого материала. Например, с температурой экстремальных значений коэффициента теплопроводности, температурой максимального удельного электросопротивления, температурой максимальной удельной теплоемкости материала, температурой минимальной плотности материала и т.д. (рис. 1).

В результате проведенной работы было установлено, что для каждого обрабатываемого материала механические характеристики относительное удлинение (δ), относительное сужение (ψ), физические характеристики коэффициент линейного расширения (α), коэффициент теплопроводности (λ), имеют минимальные значения, а удельная теплоемкость материала (C), максимальное значение при одной и той же критической температуре. То есть, для каждого обрабатываемого материала имеется критическая температура, при которой физико-механические характеристики имеют экстремальные значения.

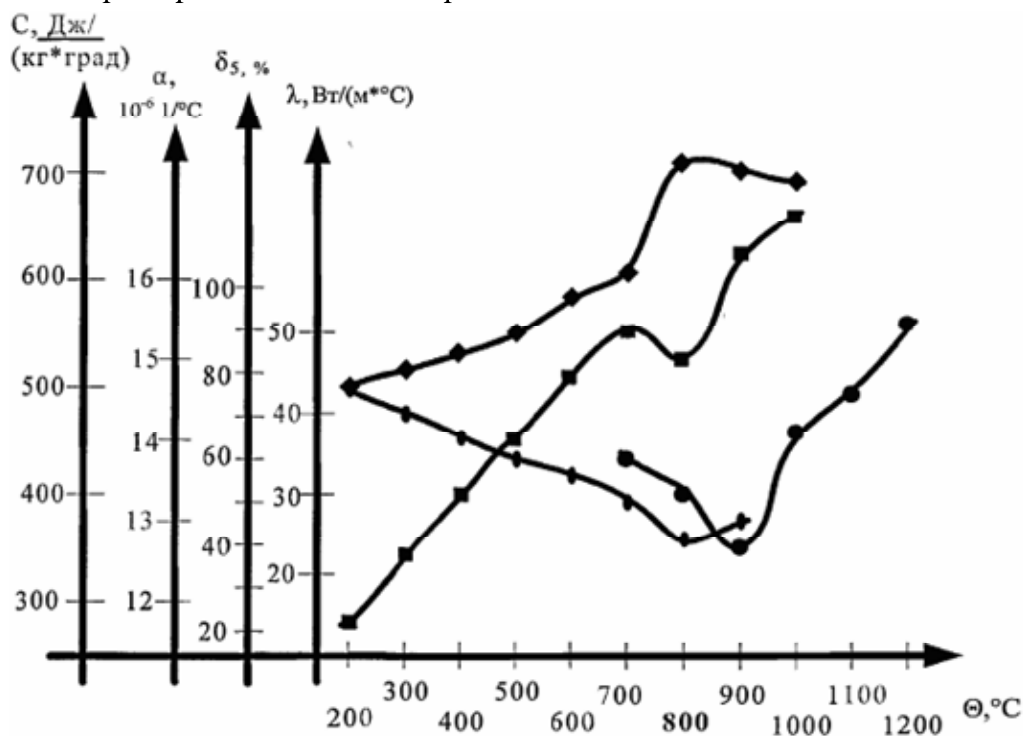


Рис. 1 – Зависимости физико-механических характеристик обрабатываемого материала У8А от температуры резания

Анализ основных характеристик процесса резания при обработке отверстий в стали У8А комбинированным инструментом из быстрорежущей стали (рис. 2), показал, что критическая температура стали У8А, которая может быть определена по температуре экстремальных значений физико-механических характеристик соответствует оптимальной температуре резания, при которой относительный износ сверла имеет минимальное, а путь резания максимальное значение, при стабилизированных составляющей силы P_z и усадке стружки ξ . Таким образом, температура A_{c3} соответствует температуре максимальной обрабатываемости стали У8А. Данное утверждение подтверждается и для других обрабатываемых материалов экспериментами проведенными учеными предшественниками.

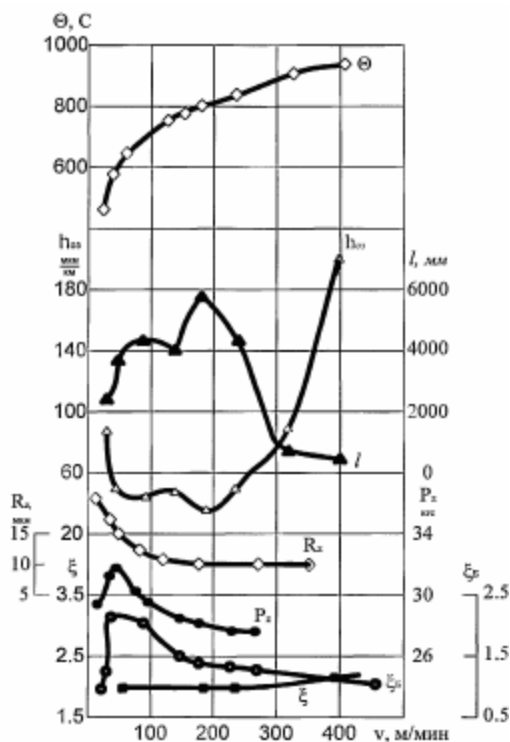


Рис. 2 – Влияние скорости резания на основные характеристики процесса обработки отверстий в стали У8А быстрорежущим инструментом ($t=5$ мм, $s=0,21$ мм/об)

На основании проведенного сравнительного анализа результатов исследований изменений физико-механических характеристик обрабатываемых материалов в зависимости от температуры и оптимизации процесса резания была сформулирована гипотеза, о возможности применения температур экстремальных значений физико-механических характеристик обрабатываемых материалов для определения температур их максимальной обрабатываемости.

Результаты экспериментальных исследований критической температуры обрабатываемого материала и относительного поверхностного износа режущей кромки, показал следующее: для стали У8А теоретически рассчитанная критическая температура составила 700°C , оптимальная экспериментальная температура резания 750°C (расхождение 7 %).

Таким образом, было установлено, что температура, при которой физико-механические характеристики имеют экстремальные значения, с достаточной точностью соответствует температуре максимальной обрабатываемости материала.

4. Пирометрические методы измерений температуры

Пирометрические методы измерений основаны на определении параметров теплового излучения объекта без нарушения его температурного поля. Данный метод устанавливает связь между излучением абсолютно черного тела и его температурой. Пирометрические методы отличаются высокой точностью результатов. Это достигается за счет индивидуального подбора светофильтров и узким спектральным диапазоном. Выбор светофильтров зависит от физико-механических свойств контролируемого материала.

Минимизация ошибки измерений достигается путем выбора прибора с более короткой волной. Большое внимание уделяется размеру измерительного пятна, т.к. 90 % энергии излучения фиксируется пирометром. Как показали проведенные исследования, при анализе процессов механической обработки целесообразно применять пирометры с фокусируемой оптикой.

В промышленных процессах производства на переднем плане часто находится не абсолютная температура, а более высокая воспроизводимость. Измерительная система должна поставлять при равных условиях равные температурные значения. Вне зависимости от абсолютной температуры эмпирически вычисленные значения температуры являются основными параметрами для высокого качества производства.

Пирометрическое измерение температуры в зоне резания позволяет значительно повысить эффективность обработки. Если температура материала измеряется пирометрическим методом, то истинная температура материала гарантированно является меньшей, чем индикация на пирометре, независимо от точного коэффициента излучения материала. Пирометр измеряет температуру материала и частично из-за отражения окружающую температуру; тем самым якобы среднюю температуру. С учетом того, что материал холоднее, чем окружающая среда, гарантируется, что актуальная температура материала ниже, чем температурная индикация и тем самым исключается перегрев материала. Тем самым можно установить более жесткие режимы обработки, при этом не опасаясь того, что произойдет перегрев материала. Постоянно осуществляется непрерывный контроль температуры обрабатываемого металла.

Выводы

В результате исследований влияния температуры на свойства материалов, было установлено, что температура, при которой физико-механические характеристики имеют экстремальные значения, с достаточной точностью соответствуют температуре максимальной обрабатываемости материала.

Пирометрическое измерение температуры в зоне резания позволяет значительно повысить эффективность обработки, т.е. установить более жесткие режимы обработки, при этом, не опасаясь того, что произойдет перегрев обрабатываемого материала.

Список использованных источников:

1. Малышев В. И. Очерки истории науки о резании материалов / В. И. Малышев. –Тольятти: ТГУ, 2011. – 216 с.
2. Чao Б. Экспериментальные исследования распределения температуры на задней поверхности реза / Б. Чao, Г. Ли, К. Триггер // Конструирование и технология машиностроения. – 1961. – № 3. – С. 21–31.
3. Татьяначенко А. Г. Особенности развития тепловых процессов при чистовой обработке отверстий комбинированным осевым инструментом / А. Г. Татьяначенко, И. Н. Лаппо // Вісник СевНТУ. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт : зб. наук. пр. – Севастополь, 2013. – Вип. 140. –С. 178–183.
4. Раннев Г. Г. Методы и средства измерений / Г. Г. Раннев, А. П. Тарасенко. – М. : Академия, 2004. – 336 с.
5. Линеveg Ф. Измерение температур в технике: справочник / Ф. Линеveg. — М. : Металлургия, 2008 – 600 с.
6. Кременчугский Л. С. Пирoeлектрические приемники излучения / Л. С. Кременчугский, О. В. Ройцина. — К. : Наук. думка, 2009. — 381 с.
7. Р 50.2.038-2004. ГСОЕИ. Рекомендации по метрологии. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределённости результата измерений. — М. : Госстандарт России, 2004.
8. Володарский В. Я. Метрология. Теория и практика / В. Я. Володарский. — М. : ВНИИМС, 2000.

References

1. Malyshev, V 2011, *Ocherki istorii nauki o rezanii materialov*, TGU, Tolyatti.
2. Chao, B, Li, G & Trigger, K 1961, 'Eksperimentalnyye issledovaniya raspredeleniya temperatury na zadney poverkhnosti reztsa', *Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroyeniya*, no. 3, pp. 21-31.
3. Tatyanchenko, A & Lappo, I 2013, 'Features of development of thermal processes at the fair to holes handling with combined axis tool', *Visnyk SevNTU, Seriya: Mashynopryladobuduvannia ta transport*, iss. 140, pp. 178-183.
4. Rannev, G & Tarasenko, A 2004, *Metody i sredstva izmereniy*, Izdatelskiy tsentr "Akademiya", Moskva.
5. Lineveg, F 2008, *Izmereniye temperatur v tekhnike*, Metallurgiya, Moskva.
6. Kremenchugskiy, L, Roytsina, O 2009, *Piroelektricheskiye priyemniki izlucheniya*, Naukova dumka, Kiev.
7. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy 2004, *Rekomendatsii po metrologii. Izmereniya pryamyne odnokratnye. Otsenivaniye pogreshnostey i neopredelennosti rezultata izmereniy*, R 50.2.038-2004, Gosstandart Rossii, Moskva.
8. Volodarskiy, V 2000, *Metrologiya. Teoriya i praktika*, VNIIMS, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 10 березня 2015 р.