

В. Г. Лебедев, Н. Н. Клименко

Одесский национальный политехнический университет

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ТЕМПЕРАТУРОЙ ШЛИФОВАНИЯ

В статье приведены результаты исследований законов нагрева и охлаждения шлифуемой поверхности (в частности скорости нагрева и охлаждения) для эффективного управления температурным режимом при шлифовании в целях получения высокого качества поверхности с точки зрения фазово-структурного состава. Показано, что температуру шлифования можно рассматривать как аperiodическое звено, постоянная времени которого зависит как от режимов шлифования так и от теплофизических характеристик металла. Приведены зависимости закономерностей нагрева и охлаждения поверхности.

Ключевые слова: постоянная времени, аperiodическое звено, время нагрева, время охлаждения.

Рис. 4. Форм. 25. Лит. 10.

В. Г. Лебедев, Н. М. Клименко

ЗАКОНОМІРНОСТІ НАГРІВАННЯ Й ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДЕТАЛІ ТЕМПЕРАТУРОЮ ШЛІФУВАННЯ

У статті наведено результати досліджень законів нагрівання й охолодження поверхні, що шліфується (зокрема швидкості нагрівання й охолодження) для ефективного управління температурним режимом при шліфуванні в цілях отримання високої якості поверхні з точки зору фазово-структурного складу. Показано, що температуру шліфування можна розглядати як аperiodичну ланку, постійна часу якої залежить як від режимів шліфування так і від теплофізичних характеристик металу. Наведено залежності закономірностей нагрівання й охолодження поверхні.

Ключові слова: постійна часу, аperiodична ланка, час нагрівання, час охолодження.

V. G. Lebedev, N. N. Klimenko

LAWS OF THE HEATING AND COOLING OF THE SURFACE LAYER OF A PART BY TEMPERATURE OF GRINDING

The results of studies of the laws of heating and cooling of the ground surface (in particular heating and cooling rates) for efficient thermal management for grinding in order to obtain a high surface quality in terms of the phase-structural composition. It is shown that the temperature of grinding can be considered as aperiodic link whose time constant depends on the mode of grinding and thermal characteristics of the metal. The dependences of the laws of the heating and cooling of the surface were shown. Points of temperature field during grinding has not only spatial but also temporal coordinates. To determine the law of temperature control and design of control systems it is not necessary to know the laws of temperature changes over time. The formation of phase-structural transformations while grinding, if we consider this process as a sequence coverage of layer after layer of grinded metal with the temperature that is higher than critical, too, takes place in time. The input relative of the process is the surface temperature and its change in the intensity of the heat flux, and the output variable with respect to the depth of phase-structural transformations is the surface temperature change.

Keywords: real-time aperiodic link, heating time, cooling time.

Введение. Повышение требований к точности деталей машин, применение новых труднообрабатываемых материалов, применение упрочняющих технологий особенно остро поставили вопрос об эффективной чистовой обработке заготовок, придающей им окончательную точность и необходимый комплекс физико-механических характеристик. Одним из видов такой обработки является чистовая обработка, в частности шлифование.

Свойства, которыми должна обладать деталь, можно условно разбить на три группы:

- геометрические свойства, т.е. точность размеров и геометрической формы детали, определяющие принципиальную возможность сопряжения данной детали с другими деталями и возможность установки данной детали в машину или механизм;
- микрогеометрические свойства, т.е. шероховатость и волнистость поверхности, в значительной степени определяющие эксплуатационные характеристики детали, в частности, показатели надежности и долговечности;
- физико-механические свойства, т.е. фазово-структурный состав поверхностного слоя детали, текстура этого слоя, напряженное состояние его, оказывающие большое влияние на эксплуатационные характеристики детали и на показатели надежности и долговечности.

Во время шлифования деталей формирование геометрических и микрогеометрических свойств не встречает принципиальных трудностей и осуществляется за счет совершенных конструкций шлифовальных станков, соответствующих характеристик шлифовальных кругов и

правильно выбранных СОЖ. Это дает возможность обеспечивать стабильные геометрические характеристики детали, а также ее микрогеометрические характеристики обусловленные необходимыми допусками [3,4].

Формирование третьей группы свойств, т.е. формирование физических свойств, наталкивается на серьезные трудности, как в плане достижений заданных свойств, так и в плане их стабильности. Известно, что после шлифования на поверхности детали образуются многочисленные шлифовочные дефекты, которые снижают общий уровень качества детали. Как показали многочисленные исследования» выполненные в данной области [8,10] эти шлифовочные дефекты образуются под действием температурно-силового фактора шлифования. Как правило, изменения твердости поверхностного слоя деталей, напряженное состояние поверхностного слоя, трещины всегда сопровождаются шлифовочными прожогами, которые представляют собой места измененного фазово-структурного состава.

Температура, возникающая в зоне контакта шлифовального круга с деталью, может иметь максимальные значения, доходящие до 1900-1300 °С, что вызывает глубокие изменения структуры.

Быстрый и неравномерный нагрев поверхностных слоев, а также быстрое их охлаждение способствуют образованию в них растягивающих напряжений значительных величин. При фазово-структурных изменениях в поверхностном слое, вследствие разной плотности фаз и структур создаются особенно благоприятные условия для образования остаточных напряжений и как следствие трещин [1].

Исследования [10] показывают, что шлифовочные дефекты стали I2X2H4A снижают долговечность детали примерно в 8 раз и предел контактной прочности на 25 %. Уменьшение стойкости матриц и пуансонов [10] (по этой же причине) вырубных штампов в 30 раз.

Шлифовочные прижоги на поверхности зубьев зубчатых колес значительно уменьшают контактную прочность зубьев. По данным работ [10] снижение контактной прочности достигает 50-70 %.

Изложенное показывает, что для обеспечения высокого качества поверхностного слоя шлифуемой детали необходимо управлять температурным режимом шлифования для поддержания температуры в безопасных пределах.

Управление же температурой шлифования предполагает знание законов нагрева и охлаждения поверхности.

Цель работы – установить законы нагрева и охлаждения шлифуемой поверхности (в частности скорости нагрева и охлаждения) для эффективного управления температурным режимом.

Результаты исследований. Точки температурного поля при шлифовании имеют не только пространственные, но и временные координаты. Для определения закона управления температурой и для разработки управляющих систем необходимо знать законы изменения температуры во времени. Образование ФСП (фазово-структурных превращений) при шлифовании, если рассматривать этот процесс как последовательный охват слоев шлифуемого металла температурой, значение которой выше критическое, тоже происходит во времени. Входной величиной по отношению в температуре поверхности является изменение интенсивности теплового потока, а входной величиной по отношению к глубине ФСП - изменение температуры поверхности. Связь между пространственными и временными координатами при распространении теплового поля устанавливается дифференциальным уравнением Фурье, имеющим вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где θ - температура поверхности; λ - коэффициент теплопроводности; τ - временная координата; x, y, z - пространственные координаты.

Если принять, что температура при шлифовании является результатом воздействия на металл теплового мгновенного плоского источника, интенсивность которого равна $Q' = \frac{Q}{F}$, где Q - мощность источника, Вт; F - площадь контакта круга с деталью, м²; то решение уравнения теплопроводности, согласно [8,9,10], может быть представлено:

$$\theta = \frac{b\sqrt{\pi Q}}{F\varepsilon} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}, \quad (2)$$

где b - Коэффициент теплораспределения между источником и поверхностью;

ε - Коэффициент тепловой активности, Дж/м²°С с^{0,5};

a - Коэффициент температуропроводности, м/с.

Если источник тепла принять за некоторую материальную среду с температурой θ_{cp} , то мощность такого источника, согласно [9,10] может быть записана:

$$Q = \frac{-\lambda(\theta_0 - \theta_c)}{\sqrt{\pi a \tau}} = \frac{\lambda \theta_c}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (3)$$

где θ_0 - начальная температура детали, для удобства расчета принята за 0.

Подставив данное выражение в выражение (2), получим:

$$\theta = \frac{b\theta_c}{\sqrt{\pi c \gamma} \cdot F} e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}, \quad (4)$$

Если учесть что $X = v_q \tau$,

то выражение (4) приводится к виду;

$$\frac{\theta}{\theta_c} = \frac{b}{F\sqrt{\pi c \gamma}} e^{-\frac{v_q^2 \tau}{4a}} = K e^{-\frac{v_q^2 \tau}{4a}}, \quad (5)$$

Следует учесть, что полученные выражения справедливы после окончания действия источника и описывают практически процесс охлаждения. Для того чтобы данная формула описывала процесс нагрева, необходимо, согласно [7,9] выражение, стоящее в правой части, вычесть из единицы. Процесс нагревания опишется, таким образом, следующим уравнением:

$$\frac{\theta}{\theta_c K} = 1 - e^{-\frac{v_q^2 \tau}{4a}}, \quad (6)$$

или

$$\theta = K\theta_c \left(1 - e^{-\frac{v_q^2 \tau}{4a}} \right), \quad (7)$$

Полагая $\frac{4a}{v_q^2} = T$ постоянной времени процесса повышения температуры, получим:

$$\theta = K\theta_c \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right), \quad (8)$$

Если данное выражение представить в операторной форме записи как отношение изображения входной величины к изображению выходной [2], то получим передаточную функцию процесса повышения температуры:

$$\omega_{(p)} = \frac{\theta_{(p)}}{\theta_{c(p)}} = \frac{K}{T_p + 1}; K = \frac{b}{F\sqrt{\pi c \gamma}} \quad (9)$$

Полученный результат показывает, что температура поверхности при шлифовании описывается как объект управления, имеющий характеристику апериодического звена.

Если учесть, что температура среды, которой является тепловой источник, непосредственно связана с режимами обработки, т.е. что имеет место равенство $\theta_c = K_1 v_q$, при достаточно малых

отклонениях от заданного значения [2] то в качестве входной величины можно принять, например, скорость детали. В этой случае переходная характеристика запишется в следующем виде:

$$\omega_{(p)} = \frac{\theta_{(p)}}{v_{q(p)}} = \frac{K \cdot K_1}{T_p + 1} \quad (10)$$

Частотная характеристика соответственно будет [2]

$$\omega_{(j\omega)} = \frac{K \cdot K_1}{T e^{-j\omega T} + 1}, \quad (11)$$

где K_1 - коэффициент пропорциональности между температурой поверхности и скоростью детали, при достаточно малых отклонениях последней от заданного значения,

ω - частота 1/с.

Передаточную функцию температуры поверхности можно получить также методом электротепловой аналогии [2].

Пусть имеется некоторый источник тепла с температурой θ . Тепловой поток направляется от источника к поверхности через некоторое тепловое сопротивление R_θ .

Величина теплового потока может быть описана выражением:

$$Q = \frac{\theta_c - \theta}{R_\theta} \quad (12)$$

С другой стороны, $Q = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$ и $\partial \theta = C_\theta \partial \theta_c$, (13)

где C_θ – теплоемкость.

Решая совместно эти выражения, получаем:

$$\theta_c = \theta + \frac{C_\theta R_\theta}{F} \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \quad (14)$$

или

$$\theta_c = \theta + T \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (15)$$

Данное выражение, записанное в операторной форме, имеет вид

$$\theta_{c(p)} = \theta_{(p)} + T_{p\theta} \quad (16)$$

Передаточная функция соответственно выразится уравнением

$$\omega_{(p)} = \frac{1}{T_p + 1} \quad (17)$$

Или в общем случае

$$\omega_{(p)} = \frac{K}{T_p + 1} \quad (18)$$

Заменяя входную величину - температуру среды на скорость детали, как было показано выше, получаем:

$$\omega_{(p)} = \frac{\theta_{(p)}}{v_{q(p)}} = \frac{K \cdot K_1}{T_p + 1} \quad (19)$$

Постоянная времени имеет вид:

$$T = \frac{C_{\theta} R_{\theta}}{F} \quad (20)$$

Площадь пятна контакта круга с деталью, в процессе врезания круга, когда за единицу времени пройдено расстояние v_q , определится произведением длины пути на ширину шлифования, т.е.

$$F = v_q \cdot B \quad (21)$$

где B - ширина шлифования.

Если представить B как $B = K_2 v_q$, то $F = K_2 v_q^2$.

Таким образом, постоянная времени будет равна:

$$T = \frac{C_{\theta} R_{\theta}}{K_2 v_q} \quad (22)$$

Постоянная времени, подсчитанная методом электротепловой аналогии, является величиной того же порядка, что и постоянная времени, выведенная теоретически.

Время теплового насыщения можно определить, если принять во внимание то, что температура шлифования рассматривается как аperiodическая звено.

Процесс нагрева определенной точки поверхности полубесконечного тела, при известных геометрических размерах источника тепла, можно свести к действию плоского мгновенного источника. Время тепловой действия этого источника на данную точку поверхности будет равно линейной длине источника делимой на скорость его движения.

Схема нагрева показана на рисунке 1.

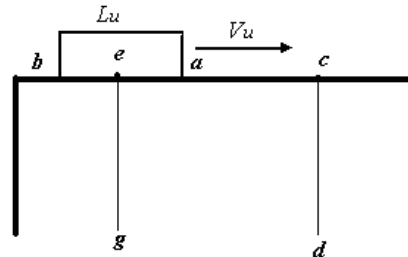


Рис. 1. Схема нагрева произвольной точки c поверхности полубесконечного тела движущимся плоским источником и приведение его к схеме мгновенного плоского источника

Пусть по поверхности полубесконечного тела движется плоский источник A , линейный размер которого Lu и скорость движения Vu . Нагрев точки пересечения c начнется, когда точка a соединится с точкой c и закончится, когда точка b соединится с точкой c . Время тепловой действия t будет

$$t = Lu/Vu$$

Очевидно, что эквивалентной схеме нагрева будет схема, когда холодный источник A находится на точке c пересечения c g и вдруг “вспыхивает” на “миг” $t = Lu/Vu$.

В этом случае, температура на поверхности полубесконечного тела будет:

$$T = \frac{112 \eta \cdot q \cdot \sqrt{\tau}}{F \cdot \varepsilon} \cdot \left[e^{\frac{-z^2}{4a\tau}} + Z \cdot \Phi \left[\frac{z}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right] \right] \quad (23)$$

где η - к.п.д. источника тепла, другими словами - сколько тепла передается металлу, q - мощность теплового источника Вт, τ - время действия источника - с, F - площадь источника m^2 , ε - коэффициент тепловой активности источника Дж/ $m^2 \cdot \text{град} \cdot c^{0.5}$.

Время теплового насыщения можно определить, если принять во внимание то, что в теории автоматического управления температура рассматривается как аperiodическое звено. В этом

случае закономерность теплового насыщения определенной точки в определенном сечении полубесконечного тела будет:

$$T_{\tau} = T_{\max} \cdot \left[1 - \exp \left(-\frac{v_u^2 \cdot \tau}{4 \cdot a} \right) \right] \quad (24)$$

Закономерность охлаждения, после окончания действия источника будет

$$T_{\tau} = T_{\max} \cdot \left[\exp \left(-\frac{v_u^2 \cdot \tau}{4 \cdot a} \right) \right] \quad (25)$$

Скорость охлаждения произвольной точки поверхности в произвольном сечении можно принять по источнику [9]. Знание этой скорости необходимо для оценки фазово-структурных преобразований в наплавленном слое. По зависимостям, полученным в данной работе, построены кривые теплового насыщения, кривые охлаждения и кривые изменения скорости охлаждения.

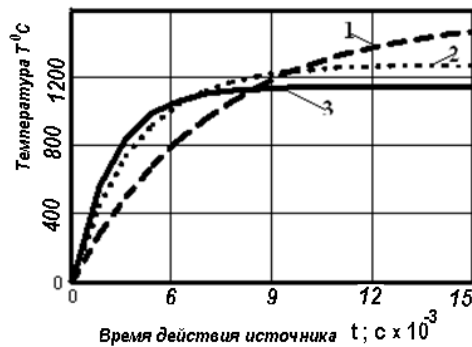


Рис. 2. Время теплового насыщения произвольной точки произвольного сечения на поверхности полубесконечного тела в зависимости от скорости перемещения источника тепла. Материал сталь X15H6; 1 - $V_{II} = 10$ м / мин; 2 - $V_{II} = 20$ м / мин; 3 - $V_{II} = 30$ м / мин. Круг Э9А16СМ1К5. $v_{кр} = 30$ м / с; $t = 0,03$ мм



Рис. 3. Закономерность охлаждения произвольной точки произвольного сечения на поверхности полубесконечного тела после прекращения действия источника тепла. Материал сталь X15H6; 1 - $V_{II} = 10$ м / мин; 2 - $V_{II} = 20$ м / мин; 3 - $V_{II} = 30$ м / мин. Круг Э9А16СМ1К5. $v_{кр} = 30$ м / с; $t = 0,03$ мм

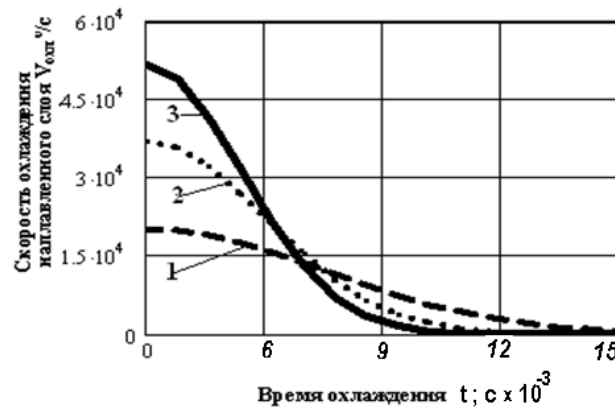


Рис. 4. Швидкість охолодження произвольної точки произвольного сечения на поверхності полубесконечного тела после прекращения действия источника тепла. Материал сталь X15H6; 1 - $V_n = 10$ м / мин; 2 - $V_n = 20$ м / мин; 3 - $V_n = 30$ м / мин. Круг Э9А16СМ1К5. $v_{кр} = 30$ м / с; $t = 0,03$ мм

Выводы.

1. Время теплового насыщения поверхности при шлифовании (время установления максимальной температуры) находится в диапазоне сотых долей секунды, что позволяет утверждать, что поверхность подвергается ударному тепловому воздействию. Время это, однако, достаточно для фазовых и структурных превращений в металле [1].

2. Время охлаждения поверхности после окончания действия теплового источника также измеряется сотыми долями секунды. Резкие и мгновенные изменения температуры создают благоприятные условия для образования тепловых дефектов на шлифуемой поверхности.

3. Скорости охлаждения поверхности после окончания действия теплового источника измеряются десятками тысяч градусов в секунду, что намного выше критических скоростей закалки, что является причиной образования прижогов при шлифовании закаленных сталей

1. Кидин И. Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве стали. – М.: Металлургия, 1957. – 312 с.
2. Клюев А. С. Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973. – 392 с.
3. Корчак С. Н. Теория обрабатываемости сталей и сплавов при абразивной обработке // Вестник южно-уральского государственного университета. Сер. Машиностроение. – 2003, № 9, Вып. 4. – С. 82-90.
4. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н., Аль-Аджелат С. А. Механизм образования прижогов при шлифовании деталей из закаленных сталей // Наукові нотатки. Науковий збірник ЛНТУ. – Луцьк, 2013, Випуск 40. – С. 141-144.
5. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н. Улучшение качества поверхности при шлифовании напыленного слоя армированного карбидом // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007, №1. – 144 с.
6. Лебедев В. Г., Клименко Н. Н., Аль-Аджелат С. А. Фазово-структурные превращения при шлифовании стальных деталей, поверхностный слой которых упрочнен закалкой // Сб. Мат. Международной научно-технической конференции. Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении. Одесса – Киев: АТМ Украины. – 2011. – С. 130-133.
7. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 392 с.
8. Редько С. Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. - Саратов: изд. Саратовского университета, 1962. – 231 с.
9. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
10. Якимов А. В. и др. Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин. – Одесса.: ОГПУ, 1997. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 27.06.2014.