

УДК621.9.06.-229.331

А.А ЯКИМОВ д-р техн. наук, Одесса, Україна

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ТЕПЛООВОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ПЕРЕРЫВИСТОЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Встановлений взаємозв'язок між параметрами режиму шліфування, теплофізичними властивостями оброблюваного матеріалу і часом теплового насичення. Зіставлення часу насичення з періодом обертання шліфувального круга дозволяє обґрунтувати технологічні можливості переривчастого шліфування і визначити умови його реалізації.

Установлена взаимосвязь между параметрами режима шлифования, теплофизическими свойствами обрабатываемого материала и временем теплового насыщения. Сопоставление времени насыщения с периодом вращения шлифовального круга позволяет обосновать технологические возможности прерывистого шлифования и определить условия его реализации.

Intercommunication between the parameters of the mode of polishing is set, by thermophysical properties of the processed material and time of thermal satiation. Comparison of time of satiation with the period of rotation of diamond-impregnated allows to ground technological possibilities of the irregular polishing and define the terms of his realization.

Постановка проблеми. При шлифовании деталей в их поверхностных слоях возникают дефекты: прижоги, трещины, растягивающие напряжения.

Прижоги – местные изменения структуры материала, образующиеся в поверхностном слое обрабатываемой детали под действием высоких температур (порядка 450–1200°C). Структурные превращения в поверхностном слое сопровождаются изменением его твердости и появлением в нем остаточных растягивающих напряжений.

Форма шлифовочных прижогов зависит от метода шлифования и

метода наладки станка. При шлифовании зубчатых колес на станке 5833 (Рейсхауэр) прижоги имеют форму светлых пятен (рис. 1), на станках 5851, 5853 (МАОГ) с 15° настройкой кругов возникают циклические темные прижоги (рис. 3), а с нулевой настройкой кругов – штриховые темные прижоги (рис. 2).

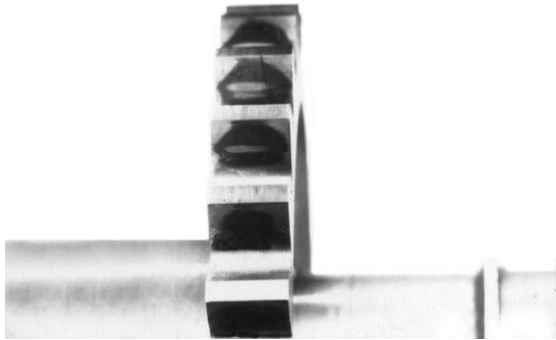


Рисунок 1 – Внешний вид прижога

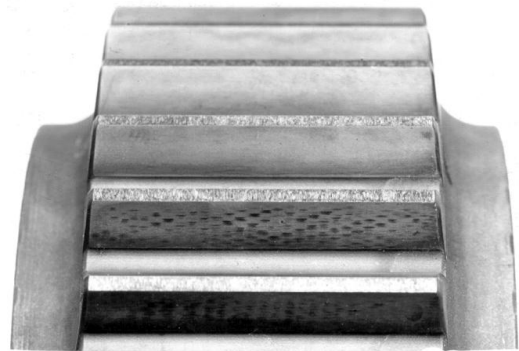


Рисунок 2 – Внешний вид штриховых прижогов

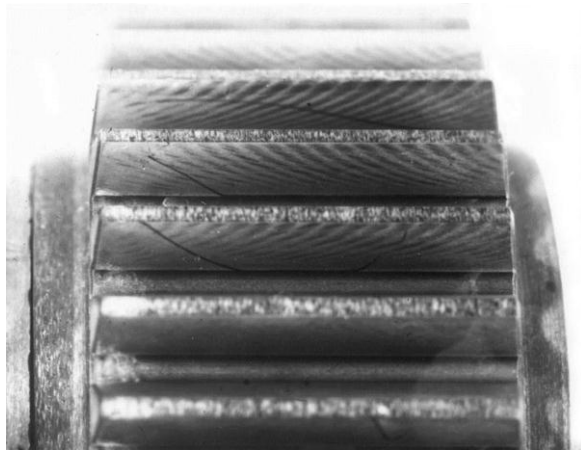


Рисунок 3 – Внешний вид циклического прижога

При шлифовании зубчатых колес конусным кругом на станках 5831 (НАИЛС) прижоги имеют форму чередующихся полос вдоль зуба. Если температура в зоне резания не превышает критическую температуру, соответствующую точке A_{C_1} на диаграмме

«железо – углерод», то на обработанной поверхности образуется прижог отпуска, а

если температура превышает эту критическую температуру – образуется прижог вторичной закалки. Отпущенная структура имеет

твердость $H_{100} = 6000\text{--}7500$ МПа при исходной твердости до шлифования $H_{100} = 8000\text{--}8500$ МПа, а вторично – закаленный слой имеет твердость $H_{100} = 9000\text{--}10000$ МПа. Под вторично закаленным слоем залегает зона с заниженной твердостью. Подобные слоистые распределения твердости в поверхностных слоях деталей вызывают появление больших растягивающих напряжений, под воздействием которых могут возникнуть шлифовочные трещины. Одним из путей предотвращения появления шлифовочных прижогов является применение абразивных кругов с прерывистой рабочей поверхностью. Для расчета геометрических параметров прерывистых кругов необходимо знать время установления стационарного теплового режима (время теплового насыщения). С момента установления стационарного теплового режима температурные поля не изменяются, и каждая точка обрабатываемой детали проходит через соответствующее распределение изотерм.

Исследованию процесса установления теплового режима при шлифовании посвящены работы [1-6]. Представляет практический интерес установление связи между временем теплового насыщения и параметрами режима шлифования.

Материал и результаты исследований. Для определения времени достижения максимальной температуры (времени теплового насыщения) воспользуемся решением [5]

$$\theta_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} e^{-\frac{\chi^2}{2\tau}} \cdot \Phi(\xi, \tau) \cdot D(Fo - \tau) \cdot \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \quad (1)$$

$$\text{где } \Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau + 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau - 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right);$$

$$Fo = \frac{a}{h^2} \cdot \tau \quad - \text{число Фурье; } U = \frac{V_d}{a} \cdot h \quad - \text{безразмерная скорость;}$$

$\xi = z/h$ – безразмерная координата вдоль оси z (направление движения теплового источника); $\chi = x/h$ – безразмерная координата вдоль оси x

(вглубь детали); $\tau = \frac{a}{h} \cdot \tau'$ – безразмерный комплекс, характеризующий время действия теплового источника; $D \cdot (Fo - \tau)$ – функция, определяющая закон изменения плотности теплового потока.

Принимая плотность теплового потока постоянной во времени, т. е. $D \cdot (Fo - \tau) = 1$, по формуле (6) произведены расчеты температуры шлифования для различных значений χ : от $\chi = 0$ до $\chi = 1$.

На рис.4 представлено распределение безразмерных температур для $U = 1, 10, 100$.

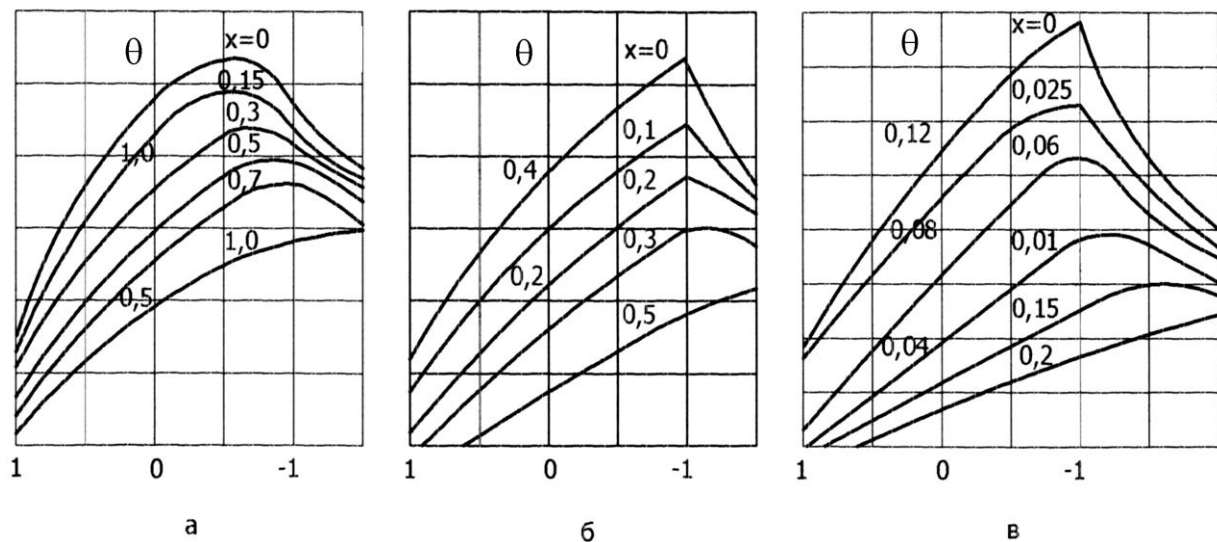


Рисунок 4 – Распределение температуры в полубесконечном теле по глубине для различных безразмерных скоростей $U = 1$ (а); $U = 10$ (б); $U = 100$ (в)

Отрезок по оси ξ (+1, -1) соответствует ширине теплового источника. Из анализа кривых следует, что при любой скорости перемещения теплового источника, точка с максимальной температурой смещается из зоны контакта в сторону противоположную направлению его движения. По кривым рис.6 можно проследить не только величину максимальной температуры, но и время выдержки при данной температуре, т. е. время, в течение которого точка тела будет находиться под воздействием данной температуры. Изменение температуры во времени на поверхности ($\chi = 0$) можно найти из решения уравнения

$$\theta_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{Fo} \Phi(\xi, \tau) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}. \quad (2)$$

Изменение температуры во времени определяется, главным образом, функцией

$$\Phi(\xi, \tau) = \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau + 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + U \cdot \tau - 1}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right). \quad (3)$$

По мере перемещения теплового источника в направлении оси z аргументы функций erf (3) будут возрастать за счет изменения τ . При возрастании аргумента функция erf быстро стремится к единице. Например, при величине аргумента $\left|\frac{\xi \pm 1 + U \cdot \tau}{2 \cdot \sqrt{\tau}}\right| = 3$ значение функции erf отличается от единицы лишь на 0,002%.

С возрастанием τ функция $\Phi(\xi, \tau)$ (3) стремится к нулю и рост интеграла (2) прекратится. Физически это означает, что с течением времени температура, достигнув максимума, прекратит дальнейшее увеличение, т. е. наступит тепловое насыщение.

Следует заметить, что в различных точках ξ вдоль направления движения теплового источника процесс насыщения наступает не одновременно.

Момент насыщения зависит от скорости V_d движения зоны контакта круга с деталью, ширины зоны резания h и температуропроводности шлифуемого материала a . В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость изменения функции $\Phi(\xi, \tau)$ от безразмерного времени (числа Фурье) Fo для безразмерной скорости (число Пекле) $U = 1$.

Сплошная кривая соответствует точке с координатами $\xi = -1$, $\chi = 0$, т. е. на задней кромке теплового источника. Штриховая кривая отражает изменение функции $\Phi(\xi, \tau)$ в точке, удаленной за источником на расстоянии восьми его полуширин $\xi = -9$, $\chi = 0$.

Левая шкала рис. 5 соответствует изменению функции $\Phi(\xi, \tau)$ в точке $\xi = -9$, правая в точке $\xi = -1$. В обоих случаях функция $\Phi(\xi, \tau)$ стремится к нулю.

Если принять время теплового насыщения соответствующее функции $\Phi(\xi, \tau) = 0,04$, что соответствует 2% от максимальной температуры, то получим время насыщения для безразмерной скорости $U = 1$

$$Fo|_{\xi=-1} = 14; \quad Fo|_{\xi=-9} = 22,$$

а для $U = 100$

$$Fo|_{\xi=-1} = 0,0245; \quad Fo|_{\xi=-9} = 0,109.$$

(4)

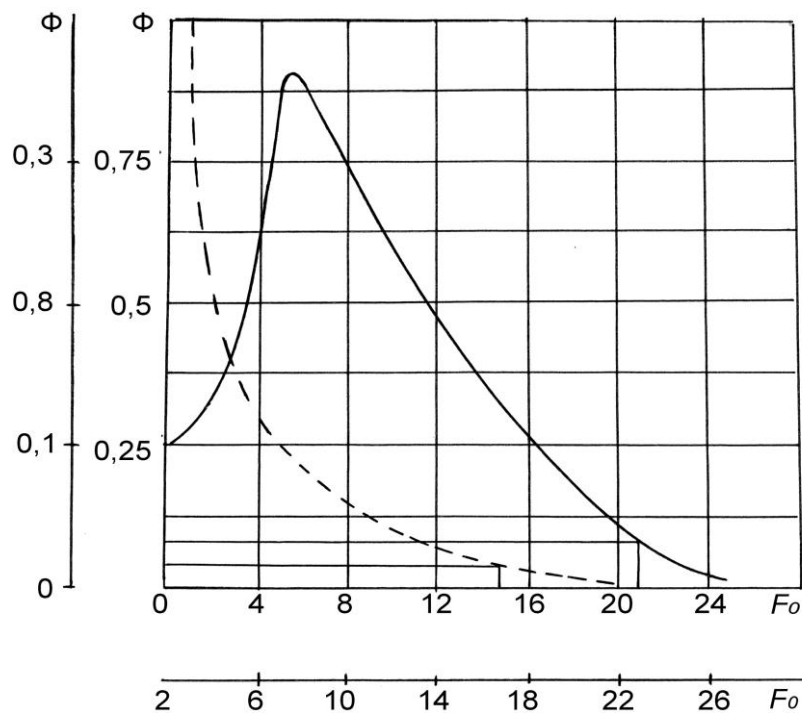


Рисунок 5 – Изменение $\Phi(\xi, \tau)$ во времени для $\xi = -9, \chi = 0$ (штриховая кривая), $\xi = 1, \chi = 0$ (сплошная кривая)

Результаты вычисления аргумента второй функции erf в (4) дают следующие значения (см. табл).

Таблиця

ξ	$U=1$	$U=100$
-1	1.6	1.44
-9	1.27	1.36

Из таблицы следует, что для выбранного условия насыщения $\Phi(\xi, \tau) = 0,04$ аргумент второй функции erf не превосходит числа 1,6 для всех значений U в интервале $1 \leq U \leq 100$ и точек поверхности $-9 < \xi < -1$. Поэтому установившийся тепловой режим на поверхности полубесконечного тела от постоянно действующего теплового источника может быть приближенно определен из условия

$$\frac{\xi + U \cdot Fo_{\text{н}} - 1}{2 \cdot \sqrt{Fo_{\text{н}}}} = A. \quad (5)$$

Из выражения (5) в общем виде имеем

$$Fo_{\text{н}} = \frac{4 \cdot A^2 + 2 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 2 \cdot A \cdot \sqrt{4 \cdot A^2 + 4 \cdot U \cdot (1 - \xi)}}{2 \cdot U^2}. \quad (6)$$

Принимая $A=1,6$ получим

$$Fo_{\text{н}} = \frac{10,24 + 2 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 3,2 \cdot \sqrt{4 \cdot U \cdot (1 - \xi) + 10,24}}{2 \cdot U^2}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что на задней кромке теплового источника $\xi = -1$ время теплового насыщения определяется из выражения

$$Fo_{\text{н}} = \frac{10,24 + 4 \cdot U + 3,2 \cdot \sqrt{8 \cdot U + 10,24}}{2 \cdot U^2}, \quad (8)$$

а для передней кромки $\xi = +1$, $Fo_{\text{н}} = \frac{10,24}{U^2}$.

В общем случае размерное время насыщения определяется по формуле

$$\tau_{\text{н}} = \frac{h^2}{a} \cdot Fo_{\text{н}}. \quad (9)$$

Для принятого нами условия $A=1,6$ с учетом (7) и (9) размерное время теплового насыщения будет иметь следующий вид

$$\tau_n = \frac{10,24}{2 \cdot V^2} + \frac{h \cdot (1 \pm \xi)}{V} + \frac{3,2}{2 \cdot V^2} \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{V \cdot h}{a} \cdot (1 \pm \xi) + 10,24}, \quad (10)$$

где $\xi = z/h$, z – координата точки, мм.

Знак (+) берется для точек, лежащих между передней кромкой теплового источника и его серединой, а (–) – для точек, расположенных от середины источника к задней кромке.

В частном случае для передней ($\xi = 1$) и задней ($\xi = -1$) кромок получим $\tau_n = \frac{10,24 \cdot a}{V^2}$, $\xi=1$.

$$\tau_n = \frac{10,24}{2 \cdot V^2} + \frac{2 \cdot h}{V} + \frac{3,2}{2 \cdot V^2} \cdot \sqrt{8 \cdot \frac{V \cdot h}{a} + 10,24}, \quad \xi = -1.$$

Таким образом, из теоретического анализа решения (8) получена формула (10) для расчета времени теплового насыщения. Установлено, что время насыщения зависит от положения точки на поверхности тела, скорости перемещения источника тепла V , области его действия $(-h, h)$ и температуропроводности материала детали.

Выводы. Установлена взаимосвязь между параметрами режима шлифования, теплофизическими свойствами обрабатываемого материала и временем теплового насыщения.

Список использованной литературы: 1. Кошин, А.А. Импульсный стохастический характер температурного поля детали в зоне шлифования / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов // Прогрессивные технологии в машиностроении. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд.-во ЮурГУ, 2007. – С.6-11. 2. Кошин, А.А. Особенности температурного поля в зоне контакта при обдирочном шлифовании / А.А. Кошин, А.А. Дьяконов, А.В. Сопельцев // Прогрессивные технологии в машиностроении. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд.-во ЮурГУ, 2007. – С.20-24. 3. Лищенко, Н.В. Определение температуры прерывистого шлифования / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, А.В. Якимов // Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник. – Одеса, 2012.

– Вип. 2(39). – С.80-85. 4. *Лищенко, Н.В.* Температура шлифования при импульсном тепловом потоке на поверхности / *Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин* //Сучасні системи технологій у машинобудуванні: Збірник наукових праць. – Д: ЛІРА. –2015. – С.54-60. 5. *Ярмонов, Н.А.* Исследование нестационарных тепловых режимов при шлифовании прерывистыми кругами. – Дис... канд. техн. наук – Пермь, 1974. – 225с. 6. *Сипайлов В.А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / *В.А. Сипайлов* //– М.: Машиностроение, 1978. – 167с.

Bibliography (transliterated): 1. Koshin, A.A. Impul'snyj stohasticheskiy harakter temperaturnogo polja detali v zone shlifovanija /A.A. Koshin, A.A. D'jakonov //Progressivnye tehnologii v mashinostroenii. Tematicheskij sbornik nauchnyh trudov. – Cheljabinsk: Izd.-vo JuurGU, 2007 – S.6-11. 2. Koshin, A.A. Osobennosti temperaturnogo polja v zone kontakta pri obdirochnom shlifovanii / A.A. Koshin, A.A. D'jakonov, A.V. Sopel'cev // Progressivnye tehnologii v mashinostroenii. Tematicheskij sbornik nauchnyh trudov. – Cheljabinsk: Izd.-vo JuurGU, 2007.– S.20-24. 3. Lishhenko, N.V. Opredelenie temperatury preryvistogo shlifovanija /N.V. Lishhenko, V.P. Larshin, A.V. Jakimov // Praci Odes'kogo politehničnogo universitetu: Naukovij ta naukovo-virobnichij zbirnik. – Odesa, 2012. –Vip. 2(39). – S.80-85. 4. Lishhenko, N.V. Temperatura shlifovanija pri impul'snom teplovom potoke na poverhnosti / N.V. Lishhenko, V.P. Larshin // Suchasni sistemi tehnologij u mashinobuduvanni: Zbirnik naukovih prac'. – D: LIRA. – 2015. – S.54-60. 5. Jarmonov, N.A. Issledovanie nestacionarnyh teplovyh rezhimov pri shlifovanii preryvistymi krugami. – Dis... kand. tehn. nauk – Perm', 1974.– 225s. 6. Sipajlov V.A. Teplovyje processy pri shlifovanii i upravlenie kachestvom poverhnosti / V.A. Sipajlov – М.: Mashinostroenie, 1978. – 167s.