

УДК 621.92.01



В.П. Ларшин,
д.т.н., професор,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail: vplarshin@
rambler.ru



Н.В. Лищенко,
доцент,
Одеський
національний
політехнічний
університет
e-mail:
odmnv@rabler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко.
Определение температуры нестационарного шлифования. Приведены характеристики и сформулированы критерии применимости дву- и одномерных математических моделей для определения температуры шлифования при непрерывном и дискретном представлении источников теплоты в зоне контакта для нестационарного и стационарного шлифования заготовок из труднообрабатываемых материалов.

V.P. Larshin, N.V. Lishchenko.
Transient grinding temperature determination. Descriptions over are brought and the criteria of applicability of two- and one-dimensional mathematical models are set forth for grinding temperature determination at continuous and discrete presentation of heat sources in the contact zone for the non-stationary and stationary grinding of works from hard-processing materials.

Введение. Многообразие конструктивных форм деталей машин определяется видом их отдельных поверхностей и комбинациями этих поверхностей. Эти поверхности можно условно разделить на две большие группы: элементарные обрабатываемые поверхности (плоскость, цилиндрическая, коническая поверхности и другие) и сложнопрофильные поверхности (резьбовая, зубчатая, пространственная криволинейная и другие). При механической обработке указанных поверхностей даже на одном технологическом переходе изменяются геометрические, теплофизические и технологические параметры обработки. Например, при токарной обработке торца вала (плоскость) с постоянной поперечной подачей при прочих равных условиях непрерывно изменяется скорость резания и имеет место износ резца во времени. При плоском шлифовании заготовок в многоместном приспособлении при обработке каждой очередной заготовки изменяется величина припуска на обработку, твердость обрабатываемого материала, геометрия зоны контакта и, кроме того, имеет место изменение режущей способности шлифовального круга по мере его износа. При торцовом фрезеровании криволинейной поверхности лопасти газотурбинного двигателя одновременно и непрерывно изменяются: глубина резания, геометрия резания, подача по строке. При этом осуществляется одновременное перемещение рабочих органов станка с ЧПУ по пяти координатам, например на обрабатывающем центре типа 500V/5. Рассматривая

изменение во времени геометрических, технологических и теплофизических параметров механической обработки можно сделать вывод, что не существует абсолютно неизменных во времени (стационарных) процессов обработки, так как даже при всех прочих постоянных условиях всегда имеет место, например, износ инструмента во времени [1]. С другой стороны теплофизические расчётные схемы обработки, как правило, просты, имеют постоянные параметры и не соответствуют фактическим сложным нестационарным явлениям, протекающим при лезвийной и абразивной обработке. Например, теплофизическая схема подвижного теплового источника, на основе которой выполняются расчеты температуры шлифования, является упрощенной схемой обработки, которая имеет место на отдельных коротких по времени этапах обработки, например, при плоском и круглом шлифовании. Однако, даже в этом случае имеет место переходный процесс установления температурного поля вокруг подвижного теплового источника. Время этого переходного процесса – время теплового насыщения – отсчитывается от момента начала движения полосового теплового источника до момента установления температурного поля вокруг этого источника в подвижной системе координат.

Нестационарность процессов механической обработки предполагает наличие переходных процессов установления физических параметров этих процессов, например, температуры и силы резания. Однако в силу высокой сложности зависимостей температурных и силовых параметров от времени исследователи выделяют отдельно технологическую теплофизику (теория теплопроводности твердых тел), технологическую динамику (исследование вибраций и автоколебаний) и технологическую термодинамику (термодинамика неравновесных процессов).

Материал и результаты исследования. Тепловой фактор при шлифовании оказывает существенное влияние на качество поверхностного слоя обрабатываемых деталей и на эксплуатационные свойства деталей машин. Исследованию тепловых полей при шлифовании посвящено большое количество работ, однако до сего времени нет единого мнения об адекватном выборе одно-, дву- или трехмерной теплофизической схемы обработки применительно к практике шлифования. Это сдерживает развитие теории тепловых явлений при шлифовании и, как следствие, разработку практических систем технологической диагностики и адаптивного управления процессом шлифования по температурному критерию.

Задача разработки теории тепловых явлений при шлифовании актуальна, например, для прерывистого, композиционного и высокопористого шлифования, которые отличаются от традиционных теплофизических задач с непрерывным тепловым потоком дискретным (импульсным) представлением источников теплоты – зёрён. Особенностью этих процессов шлифования является неопределённость их перехода из нестационарного в стационарный режим, что проявляется в переменной скорости изменения температуры шлифования на переходном этапе времени действия теплового источника и

последующем этапе охлаждения обработанной поверхности. Появление новых технологий алмазно-абразивной обработки вызывает необходимость пересмотра путей решения теплофизических задач в связи с необходимостью оптимизации перспективных технологических систем. Практика внедрения таких систем требует выбора оптимальных рабочих характеристик прерывистых, композиционных и высокопористых кругов, т.к. отсутствие соответствующих рекомендаций сдерживает развитие отечественной абразивной промышленности и приводит к необходимости закупки дорогостоящих абразивных инструментов за рубежом. Учет фактора дискретности тепловыделения важен при расчете поверхностных и приповерхностных мгновенных температур, т.к. с увеличением расстояния от обрабатываемой поверхности дискретный характер тепловых потоков на поверхности отражается только в соответствующих уровнях непрерывных тепловых потоков на глубине. Это вытекает из известного «принципа местного влияния», установленного академиком Н.Н. Рыкалиным [2].

Теплофизическая схема, по которой выполняют расчеты температуры шлифования, содержит подвижный полосовой источник, протяженностью $2h$, который движется со скоростью v (рис.1).

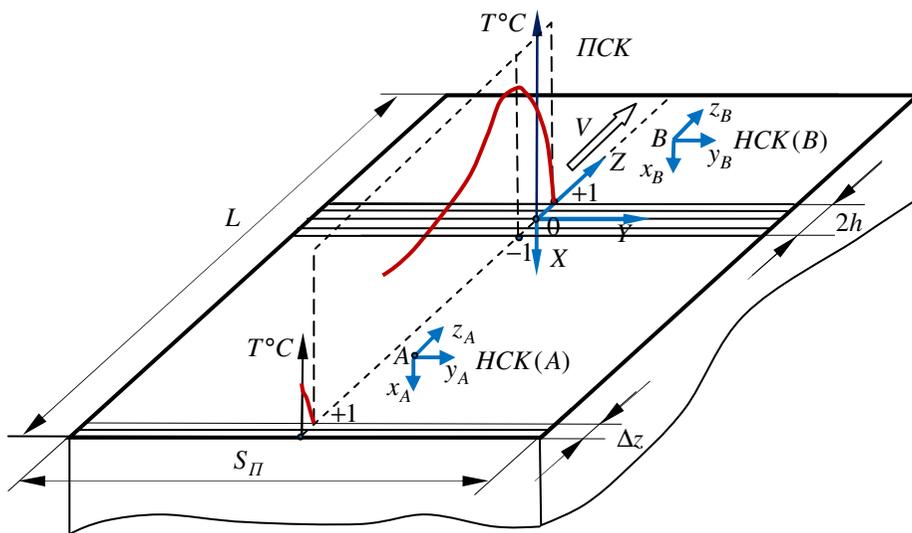


Рис.1. Теплофизическая схема теплового процесса при шлифовании

Формирование температурного поля обычно рассматривают в двух системах координат: подвижной системе координат (ПСК), которая связана с тепловым источником, и неподвижной (НСК), принадлежащей отдельным точкам обрабатываемой поверхности.

Имеющиеся в литературе расчетные формулы для определения температуры в ПСК получены для стационарного (не зависящего от времени) теп-

лового поля этого источника. Это стационарное поле формируется в течение некоторого времени переходного периода $\tau_{t.p.}$, получившего название «время теплового насыщения» [3].

Следует различать два подвижных тепловых источника: практический источник (близкий к реальному источнику) и теоретический (существующий в математической трактовке). Можно дать следующую поэтапную характеристику переходного процесса становления температурного поля для практического подвижного теплового источника (рис.2,а).

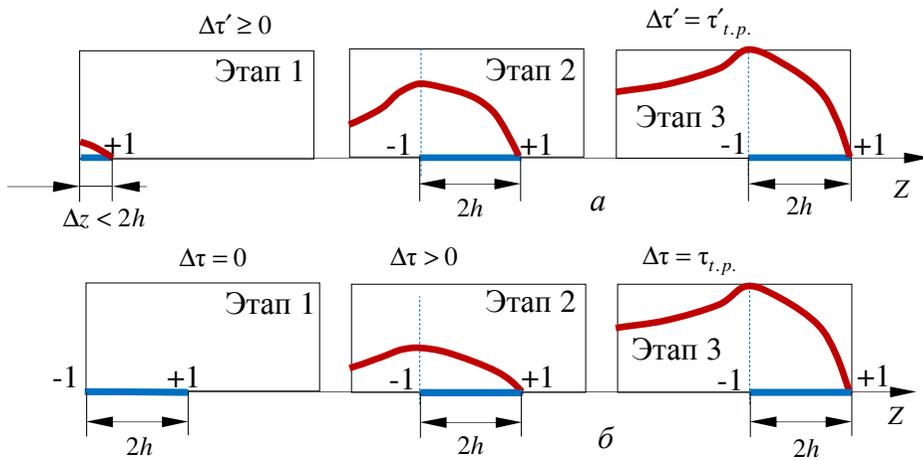


Рис.2. Этапы формирования температурного поля вокруг практического (а) и теоретического (б) подвижных тепловых источников

1. Начало переходного процесса практического источника отсчитывается от первоначального касания круга и обрабатываемой детали (этап 1 на рисунке 2,а). Затем формируется переменная по протяженности полоса контакта с текущей протяженностью $\Delta z = V\Delta\tau'$, где $0 \leq \Delta\tau' \leq \tau'_{t.p.}$ – текущее время на интервале переходного, т.е. нестационарного периода.

Протяженность Δz этой полосы на нестационарном интервале времени $0 \leq \Delta\tau' \leq \tau'_{t.p.}$ меньше $2h$, т.е. $\Delta z < 2h$ (этап 1 на рисунке 2,а).

2. Через некоторое время протяжённость полосы достигает своего установившегося значения $2h$ (этап 2 на рисунке 2,а).

3. После этого требуется некоторое дополнительное время, по завершении которого температурное поле в ПСК перестает изменяться как по координатам X, Y, Z (см. рисунок 1), так и по времени, которое отсчитывается после окончания интервала $0 \leq \Delta\tau' \leq \tau'_{t.p.}$ (этап 3 на рисунке 2,а).

Аналогичная поэтапная характеристика становления *теоретического подвижного теплового источника* следующая.

1. Источник протяженностью (шириной) $2h$ в момент времени $\Delta\tau = 0$ коснулся обрабатываемой поверхности и одновременно начал двигаться со скоростью V в направлении оси Z (этап 1 на рисунке 2,б).
2. Через некоторое время $\Delta\tau > 0$ вокруг движущегося источника, формируется промежуточное нестационарное температурное поле (этап 2 на рисунке 2,б).
3. При достижении условия $\Delta\tau = \tau_{t,p.}$ температурное поле перестает изменяться как по координатам X, Y, Z в ПСК (см. рисунок 1), так и по времени (этап 3 на рисунке 2,б).

Таким образом, формирование температурного поля вокруг практического теплового источника осуществляется одновременно с образованием самого этого источника. В то же время температурное поле вокруг теоретического теплового источника начинает формироваться после того, как сам источник длиной $2h$ полностью сформировался (по габаритам) и начал двигаться со скоростью V в направлении оси Z .

Следовательно, время теплового насыщения теоретического теплового источника всегда меньше одноименного времени практического теплового источника, т.е. $\tau_{t,p.} < \tau'_{t,p.}$ (рисунок 2).

В литературе имеется решение задачи определения времени насыщения теоретического теплового источника [3]. Для одноименного практического теплового источника соответствующие математические модели формирования температурного поля не установлены.

Таким образом, в момент касания шлифовального круга и заготовки начинается первый переходный процесс формирования температурного поля от движущегося теплового источника.

После окончания первого переходного процесса, во время которого имеет место нестационарный режим (температурное поле является нестационарным), наступает тепловое насыщение, после которого температурное поле подвижного теплового источника становится стационарным (квазистационарным), т.е. не зависящим от времени (график на вертикальной плоскости на рисунке 1).

Термин «стационарность (квазистационарность)» относится к температурному полю, которое формируется в ПСК (эта ПСК движется вместе с тепловым источником).

После окончания первого переходного процесса при наличии встроенных в шлифовальный круг термодпар [3] можно зафиксировать максимальную поверхностную температуру шлифования (выходной сигнал термодпар), имеющую место в районе задней кромки источника в ПСК.

Установившучося температуру шліфования в любой точке с координатами Z и X находят по известному уравнению двумерной математической модели квазистационарного температурного поля [3].

Попытка описать нестационарное температурное поле в подвижной системе координат (ПСК) предпринята в работе [3] применительно только к теоретическому тепловому источнику.

Однако, как показано выше (см. рисунок 2) нестационарность процесса теплового насыщения (по времени $0 \leq \Delta\tau \leq \tau_{i,p.}$) в этой работе характерна только для теоретического теплового источника, что не соответствует реальному нестационарному процессу (по времени $0 \leq \Delta\tau' \leq \tau'_{i,p.}$) в условиях влияния переменной протяженности полосы (от 0 до $2h$) на температуру. В дальнейшем время переходного процесса в ПСК для теоретического подвижного теплового источника будем называть временем первого переходного процесса в отличие от времени второго переходного процесса в неподвижной системе координат (НСК).

Отметим также, что достигнутая стационарность теплового поля подвижного теплового источника соответствует исключительно мгновенным параметрам состояния этого источника и в любой момент времени может быть нарушена.

Действительно, достаточно, например, изменить только скорость V источника при прочих равных условиях, и достигнутая стабильность температуры $T(X_i, Y_i, Z_i, V)$ в ПСК нарушается и начинается новый переходный процесс формирования установившейся температуры.

Этот новый переходный процесс заканчивается формированием новых установившихся значений температур в тех же самых рассматриваемых точках ПСК. Например, для той же самой i -ой точки новое установившееся значение температур составит $T'(X_i, Y_i, Z_i, V')$, причем $T(X_i, Y_i, Z_i, V) \neq T'(X_i, Y_i, Z_i, V')$, т.е. при изменении скорости от значения V до значения V' стационарная температура изменится от значения T до T' .

Если скорость V теплового источника достаточно большая, то можно пренебречь временем нарастания протяженности источника от 0 до $2h$ (это время равно $\tau_n = \frac{2h}{V}$), которое отсчитывается от касания и пользоваться имеющимися формулами для определения нестационарной температуры [3].

Таким образом, имеющиеся в литературе, например в работе [3], двумерные математические модели формирования температурного поля описывают стационарный тепловой процесс, т.е. после того как температурное поле в ПСК стабилизировалось.

Многие исследователи неоправданно пользуются этими моделями, не сопоставляя время первого переходного процесса с реальным машинным временем шліфования отдельно рассматриваемой обрабатываемой детали, в

том числе при многоместной обработке, когда обрабатываемые детали уложены «в стык», например, на столе плоскошлифовального станка.

Однако, температурное поле в течение времени одного продольного хода стола станка «не перескакивает» с одной обрабатываемой детали на другую из-за наличия адиабатических стенок даже соприкасающихся друг с другом торцов этих деталей.

В каждой из обрабатываемых деталей имеет место первый переходный процесс изменения температуры. Если протяженность детали незначительна (не более 5 мм), то время первого переходного процесса (время теплового насыщения) сопоставимо с машинным временем обработки отдельной детали.

В прикладных задачах определения температуры шлифования температурное поле определяют в различных точках НСК, центр которой совмещают с рассматриваемой точкой поверхности (см. точку А или точку В на рисунке 1).

Температурное поле в этих точках появляется после того, как сформировавшийся подвижный полосовой источник при своем движении оказывается над рассматриваемой точкой поверхности.

Этапы этого процесса следующие.

1. Первоначально с рассматриваемой точкой совмещается передняя кромка теплового источника, расположенная в координате $Z = +1$ (рис. 1).

2. Через время нагрева, равное $\tau_H = \frac{2h}{V}$, над этой точкой окажется задняя кромка подвижного источника ($Z = -1$).

Как следствие, температура в рассматриваемой точке будет увеличиваться до максимально возможной величины.

В связи с этим изменением температуры имеет место второй переходный процесс в НСК, отличный от описанного выше первого переходного процесса в ПСК.

Механизм второго переходного процесса заключается в последовательном увеличении температуры рассматриваемой точки (например, точки А на рисунке 1), а также всех нижележащих точек поверхностного слоя по координате x_A (см. рисунок 1).

При этом считается, что к данному моменту подвижный тепловой источник уже сформировался и время шлифования превышает время теплового насыщения, т.е. первый переходный процесс уже закончился.

Следует отметить, что если бы первый переходный процесс не закончился, то вокруг подвижного теплового источника не было бы квазистационарного теплового поля.

Соответственно не было бы распределения температуры по координате x_A (см. рисунок 1).

Отсюда следует вывод: прежде чем оценивать температуру в точке А и по координате x_A (см. рисунок 1) необходимо убедиться, что первый переходный процесс закончился, т.е. машинное время текущего шлифования превышает время теплового насыщения $\tau_{t.p.}$ (указано время насыщения для теоретического теплового источника, т.к. для практического теплового источника задача до сих пор не только не решена, но даже не поставлена).

Наблюдаемое изменение температуры в рассматриваемой точке (например, точки В на рисунке 1), а также в других точках по глубине поверхностного слоя является реакцией или функцией отклика на скачкообразное изменение плотности теплового потока в этой точке (граничное условие второго рода).

Особенностью описанных переходных процессов (первого и второго) является стабилизация (по уровню) температурного поля в первом переходном процессе (квазистационарное температурное поле) и отсутствие такой стабилизации (по уровню) температурного поля во втором переходном процессе: при наличии граничного условия второго рода температура поверхности и по глубине поверхностного слоя на интервале нагрева всегда увеличивается.

При этом во втором переходном процессе имеется участок относительно быстрого изменения температуры, который можно назвать квазипереходным процессом, в течение которого температура относительно быстро достигает высокого уровня, близкого к максимальному уровню.

Применительно к прерывистому шлифованию температура шлифования складывается из двух составляющих: аperiodической составляющей и периодической.

При этом амплитуда периодической составляющей также подвержена переходному процессу, в течение которого она относительно быстро стабилизируется (см. статью «Определение температуры шлифования при импульсном тепловом потоке» авторов Ларшина В.П. и Лищенко Н.В.).

Установлено, что результаты расчётов максимальных температур шлифования по уравнениям дву – и одномерной математической модели (для стационарного и нестационарного процессов, соответственно) отличаются не более, чем на 10 % [4] при условии, что первый переходный процесс закончился.

Выводы.

1. Необходимым условием адекватности применения стационарного решения двумерного дифференциального уравнения теплопроводности является окончание переходного процесса изменения температуры в подвижной системе координат; длительность этого переходного процесса равна времени теплового насыщения.

2. Достаточным условием применения стационарного двумерного и нестационарного одномерного решений (после того как выполнено необходи-

мое условие) для описания непрерывно и импульсно возрастающей температуры является окончание второго переходного процесса изменения температуры в неподвижной системе координат, в течение которого применительно к прерывистому шлифованию стабилизируется амплитуда температурных импульсов в этой системе координат.

Литература

1. Постнов, В.В. Термодинамика и технология нестационарной обработки металлов резанием / В.В. Постнов, В.Л. Юрьев.— М.: Машиностроение, 2009.— 269 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Расчёты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин.— М.: Машгиз, 1954.— 296 с.
3. Сипайлов, В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. — М.: Машиностроение, 1978. — 167 с.
4. Ларшин, В.П. Применение решений теплофизических задач к расчету температуры и глубины дефектного слоя при шлифовании // Межвуз. сб. науч. тр. / В.П. Ларшин, Е.Н. Ковальчук, А.В. Якимов. — Пермь: Изд-во ППИ, 1986. — С. 9—16.