

На основании рис. 5–10 и табл. 2 можно сделать вывод о том, что увеличение вероятности мутации способствует увеличению скорости сходимости целевой функции.

Таблица 2. Результаты минимизации различных критериев при различной вероятности мутации

Функции	Время, с		X^{opt}
	$p_{mut} = 0,3$	$p_{mut} = 0,03$	
Расстригина–Шефела	{177;189,8;178,2}	{233,4;231;243,8}	153,114
Розенброка–Расстригина	{269,7;255;287,7}	{422;375,5;399,2}	4,115
Розенброка–Шефела	{151;147,6;265,7}	{485,2;431;380,6}	2,015
Розенброка–Шефела–Расстригина	{280;250,2;278,3}	{487;300,5;456,6}	4,115
Розенброка–Шефела– $F_5(X)$	{150;165,5;178,3}	{252;225,3;325,3}	2,015
Розенброка–Расстригина– $F_5(X)$	{250,2;289;245,5}	{380,6;456,2;398}	4,115
Расстригина–Шефела– $F_5(X)$	{420,2;325,2;355}	{556,3;456,654,2}	153,11

Это может обуславливаться тем, что большая вероятность мутации способствует уменьшению вероятности зависания вблизи локального экстремума.

Список литературы

1. Пупков, К. А. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. – М. : Изд-во МГТУ, 2002. – 744 с.
2. Гуляшинов, А. Н. Теория принятия решений в сложных социотехнических системах / А. Н. Гуляшинов, В. А. Тенев, Б. А. Якимович. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2005. – 280 с.
3. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – М. : Наука, 1982. С. 9–64.
4. Тенев, В. А. Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ. – 2006. – № 2(8). – С. 103–108.
5. Тенев, В. А. Применение генетических алгоритмов с вещественным кроссовером для минимизации функций большой размерности // Интеллектуальные системы в производстве. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ. – 2006. – № 1. – С. 93–107.

УДК 621.923.01

С. А. Шияев, кандидат технических наук, доцент
Ижевский государственный технический университет

СХЕМАТИЗАЦИЯ СВОЙСТВ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РОТАЦИОННОМ ЛЕНТОЧНОМ ШЛИФОВАНИИ

В статье рассмотрена схематизация технологической операции ротационного ленточного шлифования при исследовании тепловых процессов.

Шлифование является наиболее распространенным методом финишной обработки, который обеспечивает высокую геометрическую точность, производительность, возможность получения высококачественного поверхностного слоя. В лите-

ратурных источниках очень мало сведений о свойствах поверхностного слоя обрабатываемых материалов, которые в значительной степени определяются технологическими показателями (прижоги, микротрещины, структурные превращения, остаточные напряжения и т. п.). Наиболее высокие температуры развиваются в тончайших граничных слоях, а по мере удаления от поверхности (углубления) температура снижается, поэтому знание распределения температуры по объему обрабатываемой детали имеет немаловажное значение. Особенно это актуально при шлифовании проволоки малого диаметра. Существующие в настоящее время результаты теоретических исследований позволяют достаточно точно спрогнозировать поле температур, возникающих в детали при шлифовании.

Современные методы расчета тепловых полей можно разделить на аналитические [1] и численные [2; 3]. Аналитические методы расчета являются наиболее точными, но практическое их использование связано с очень большими математическими трудностями и возможно лишь после идеализации начальных и граничных условий (шлифуемая поверхность имеет неограниченные размеры и толщина изделия бесконечна). Численные методы по сравнению с аналитическими более просты и универсальны, позволяют учитывать любые факторы, которые влияют на формирование температурного поля в обрабатываемой детали.

Для получения разностного решения, описывающего реальный процесс изменения температурного поля в количественном и качественном отношении, необходимо выполнение закона сохранения энергии для разностного решения.

Для непрерывного точного решения закон сохранения энергии выполняется для произвольной области тела. Для разностного решения требование выполнения закона сохранения энергии имеет важную особенность, обусловленную дискретным разбиением тела. А именно, поскольку разностное решение ищется в отдельных точках тела, то необходимо разбить тело на такое же число элементарных объемов, каждый из которых будет включать одну точку, а затем потребовать выполнения закона сохранения энергии как для произвольного элементарного объема, так и для любой области, составленной из этих элементарных объемов (следовательно, и для всего тела). Последнее требование будет выполнено, если обеспечить условие согласования тепловых потоков для любых соседних объемов, заключающееся в равенстве значений, протекающих через общую границу тепловых потоков [4].

Тепловыделение при ленточном шлифовании металлов и сплавов значительно меньше, чем при шлифовании абразивными кругами. Однако температуры в зоне резания достаточно высокие и могут вызывать существенное изменение физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемых деталей и привести к появлению шлифовочных дефектов. Температурные закономерности, полученные при шлифовании абразивными кругами, не могут быть полностью перенесены на процесс обработки лентами, т. к. при шлифовании лентами с применением контактных роликов или копиров разной жесткости и повышенной теплопроводности будут изменяться условия теплообмена в зоне резания.

Теплофизические параметры шлифовальной шкурки дают основание утверждать, что тепловой баланс ленточного шлифования будет иной, чем при шлифовании абразивными кругами, т. к. с увеличением теплопроводности гибкого абразивного инструмента уменьшается доля тепла, идущего в деталь.

Ротационное ленточное шлифование характеризуется малой площадью контакта инструмента с заготовкой. При этом активность теплового источника, движущегося в процессе обработки по поверхности детали, можно определить как [1]

$$q = \frac{P_z V_{\text{л}}}{F_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; $V_{\text{л}}$ – скорость ленты, м/с; $F_{\text{к}}$ – площадь контакта, м².

Из формулы (1) видно, что с уменьшением площади контакта увеличивается тепловой поток. Поэтому для определения воздействия температуры на поверхностный слой детали, а значит и фазовых изменений металла, необходимы теоретические и практические исследования теплового поля в зоне обработки.

Общее состояние поверхностного слоя детали определяется не только температурой в зоне контакта детали и инструмента, но и всем пространственно-временным температурным полем. При назначении технологического режима необходимо знать о распределении температуры в процессе шлифования в обрабатываемой заготовке. Поэтому возникает необходимость управления тепловым потоком в процессе шлифования и получения функции распределения температурного поля в пространстве и во времени.

Теоретическое определение теплового поля в обрабатываемой детали является одной из важнейших задач. Данное решение позволит на этапе расчета режимов резания определить тепловую напряженность шлифуемой проволоки, что даст возможность решить задачи оптимизации технологического процесса.

Необходимым результатом решения этой задачи является разработка математической модели, позволяющей проводить расчет тепловых полей, возникающих при обработке проволоки шлифовальной лентой. В процессе математического моделирования необходимо решить ряд задач, а именно: разработать схему моделируемого процесса, взяв в расчет одни факторы и отбросив другие с учетом точностных требований к математической модели, и выбрать или разработать метод решения получившихся уравнений с учетом требований, предъявляемых к математической модели. Кроме этих этапов может иметь место формализация расчетной методики и разработка программы моделирования исследуемого явления на ЭВМ.

Первый этап математического моделирования того или иного физического процесса или явления – схематизация реального процесса. Цель схематизации заключается в нахождении компромисса между точностью описания реального явления и сложностью математической модели. При этом, в общем случае, существует два ограничения: на предельно допустимую точность описания процесса и предельно допустимую сложность математической модели. Достаточная точность описания процесса зависит от множества факторов и не всегда поддается научно обоснованному выбору. При решении большого числа научно-технических задач говорят о достаточной для практических целей технической или инженерной точности (погрешности), не вдаваясь в подробности относительно ее численного значения и обоснования. Что касается допустимой сложности математической модели, то она может быть ограничена квалификацией инженера и имеющимися в его распоряжении временными и материально-техническими ресурсами (вычислительной техникой и ее быстродействием).

В нашем случае математическое моделирование процесса ротационного ленточного шлифования проволоки требуется для оптимизации условий обработки при ограничении температуры поверхности детали. Возможна и другая постановка оптимизационной задачи. Например, обеспечить заданный тепловой режим обработки с целью достижения оптимальных температур процесса.

Сформулируем требования к модели процесса следующим образом: модель должна описывать тепловое поле в шлифуемой заготовке с точностью, достаточной для практических целей, поддаваться алгоритмизации и последующей реализации в виде расчетной программы для ЭВМ и обеспечивать просчет теплового поля за приемлемое время. Эти требования не являются жесткими, единственное необходимое условие – возможность формализации методики расчета теплового поля. Нечеткость обоснования требуемых точности описания процесса и сложности модели (которая оказывает влияние на время, необходимое для расчета температурного поля в детали) вызвана тем, что в разных случаях требуемая точность может существенно отличаться, как может отличаться и быстродействие вычислительной техники, имеющейся в распоряжении инженера.

Схематизация технологического процесса механической обработки материалов состоит из нескольких этапов [5]:

- схематизация источников теплоты;
- схематизация свойств и теплофизических характеристик обрабатываемых материалов;
- схематизация геометрической формы тел;
- схематизация процессов теплообмена, заключающаяся в наложении на модель начальных и граничных условий.

В данной статье рассмотрим подробно схематизацию свойств и теплофизических характеристик обрабатываемых материалов. В процессе ротационного ленточного шлифования теплота выделяется в результате трения режущего инструмента (ленты) об обрабатываемую поверхность (проволоку) в зоне их контакта. Зона контакта инструмента и заготовки ограничена шириной ленты и углом охвата лентой обрабатываемой поверхности.

Для решения задачи о распределении температуры в некотором физическом теле необходимо знать коэффициент теплопроводности материала тела λ и коэффициент объемной теплоемкости $c_v = c' \rho_m$, поскольку эти величины в явном виде входят в уравнение теплопроводности. В общем случае эти величины являются функциями координат и температуры. Договоримся считать обрабатываемое тело изотропным и однородным в отношении коэффициентов теплопроводности и теплоемкости, а вопрос о зависимости указанных характеристик от температуры рассмотрим более подробно.

В [5] приводятся результаты расчетов распределения температур на поверхности полуограниченного тела из углеродистой стали под действием полосового движущегося источника теплоты. Различие результатов при решении линейной ($\lambda = \text{const}$, $c' \rho_m = \text{const}$) и нелинейной ($\lambda \neq \text{const}$, $c' \rho_m \neq \text{const}$) задач очень мало (3...4 %). В то же время, при $\lambda \neq \text{const}$, $c' \rho_m = \text{const}$ различие максимальных температур составляет 12...15 %. Авторы объясняют это тем, что при возрастании температуры теплопроводность углеродистой стали увеличивается, теплоемкость уменьшается, что нейтрализует влияние обоих коэффициентов на температуру поверхности обрабатываемой детали.

В нашем случае, по-видимому, необходимо получить решения для постоянных и переменных коэффициентов λ и $c' \rho_m$ и по результатам решения сделать вывод о целесообразности использования коэффициентов λ и $c' \rho_m$ как функций температуры. Табличные данные для стали ШХ15 следующие: $\lambda = 0,08 \text{ кал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})$, $c' \rho_m = 1,23 \text{ кал}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

В то же время графические зависимости коэффициентов теплопроводности и массовой теплоемкости для низко- и среднелегированных сталей, приведенные в [5], свидетельствуют о полуторакратном (0,065...0,10) изменении λ и более чем двукратном (0,11...0,27) изменении c' в интервале температур 0...800 °С.

Для обеспечения возможности вычисления значения коэффициента λ или c' необходимо аппроксимировать имеющиеся кривые функциональными зависимостями. Решение будем искать в виде полинома:

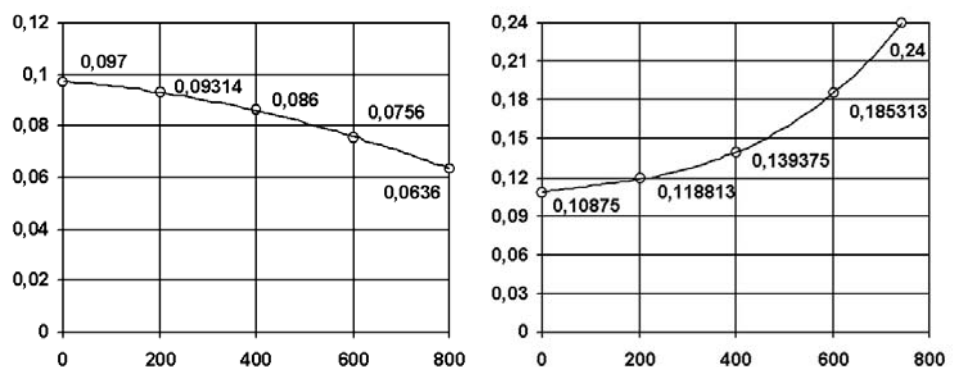
$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (2)$$

Начав с полинома второй степени (поскольку графические зависимости, приведенные в [5], обладают ярко выраженной нелинейностью) и постепенно повышая его степень до тех пор, пока не будет достигнуто удовлетворительное качество аппроксимации. В результате аппроксимации графических зависимостей, «сколотых» по пяти точкам каждая, методом наименьших квадратов [6; 7; 8] получены зависимости для коэффициентов теплопроводности λ и массовой теплоемкости c' :

$$\lambda = -3,489 \cdot 10^{-08} \cdot T^2 - 1,426 \cdot 10^{-05} \cdot T + 9,714 \cdot 10^{-02};$$

$$c' = -2,892 \cdot 10^{-10} \cdot T^3 - 3,713 \cdot 10^{-08} \cdot T^2 + 4,550 \cdot 10^{-05} \cdot T + 1,088 \cdot 10^{-01}.$$

На рисунке показаны аппроксимированные зависимости для коэффициента λ полиномом второй степени и коэффициента c' (полином третьей степени), т. к. попытка аппроксимации коэффициента c' с полиномом второй степени приводит к визуально заметным погрешностям. Также на рисунке показаны затабулированные точки, по которым строились аппроксимирующие зависимости.



Аппроксимация коэффициентов λ [кал/(см·с·°С)] (слева) и c' [кал/(см³·°С)] полиномами, затабулированные точки взяты по [5]

Заметим, что кривые, использованные для аппроксимации, представляют собой усредненные зависимости для низко- и среднелегированных сталей и, безусловно, отличаются от характеристик стали ШХ15. Однако, как показали исследования, использование других зависимостей для данных коэффициентов не представляет сложностей благодаря разработанной программе расчета тепловых полей.

Список литературы

1. *Сипайлов, В. А.* Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М. : Машиностроение, 1978. – 167 с. ; ил.
2. *Дульнев, Г. Н. и др.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена : учебное пособие для теплофизических и теплоэнергетических специальностей вузов. – М. : Высш. шк., 1990. – 207 с. ; ил.
3. *Резников, А. Н.* Тепловые процессы в технологических системах : учебник для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с. ; ил.
4. *Масалов, К. Н.* Расчет теплового поля методом баланса при шлифовании : сб. науч. тр. аспирантов и преподавателей / К. Н. Масалов, А. Ю. Кузнецов, С. В. Назаров. – Ижевск : ИТН и ПРП, 2000. – С. 3–7.
5. *Резников, А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с. ; ил.
6. *Завьялов, Ю. С.* Методы сплайн-функций / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. – М. : Наука, 1980. – 352 с. ; ил.
7. *Мудров, А. Е.* Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск : М.п. «РАСКО», 1991. – 272 с. ; ил.
8. *Самарский, А. А.* Численные методы : учеб. пособие для вузов по специальности «Прикладная математика» / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – М. : Наука, 1989. – 429 с. ; ил.
9. *Шиляев, С. А.* Моделирование тепловых процессов при ротационном ленточном шлифовании свободной ветвью абразивной ленты бунтовой проволоки : сб. науч. тр. аспирантов и преподавателей / С. А. Шиляев, А. В. Монаков, С. В. Моисеев. – Ижевск : ИТН и ПРП, 2000. – С. 8–12.