

МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКЕ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ*

Алексей А. Узенгер, Александр А. Узенгер

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается задача создания модели температурных полей при механической обработке металлической заготовки, с учетом и без учета зависимости предела текучести материала от температуры.

Ключевые слова: *теория теплопроводности, фундаментальное решение, теплофизика резания, термомеханика резания, система с распределенными параметрами.*

При механической обработке металлической заготовки возникающее температурное распределение в обрабатываемом материале и инструменте и, в частности, предельные температуры в зоне контакта определяют работоспособность инструмента и качество поверхностного слоя обрабатываемого изделия. В поверхностном слое заготовки при механической обработке протекают процессы упрочнения и разупрочнения, зависящие от преобладания действий в зоне резания силового и теплового фактора. Помимо этих факторов участвуют структурные и фазовые превращения. Но так как доля этих составляющих незначительна, то их не учитывают.

Учет силового фактора приводит к задаче исследования возникновения остаточных напряжений в поверхностном слое. Одной из основных причин является деформирование инструментом кристаллической структуры образуемого слоя. При этом он претерпевает упругую и пластическую деформацию в направлении резания. После удаления режущего инструмента пластически растянутые верхние слои металла, связанные как единое целое с нижележащими слоями металла, приобретают остаточные напряжения сжатия. И, как следствие, в нижележащих слоях развиваются уравновешивающие их остаточные напряжения.

Учет теплового фактора при металлообработке входит в область задач теплофизики резания, основоположниками которой являются А.Н. Резников и С.С. Силин [1]. В теплофизике используется допущение о независимости предела текучести материала от температуры, что позволяет считать распределение плотностей тепловых потоков на контактных поверхностях инструмента не зависящими от температуры. При этом результаты расчета температуры сильно зависят от предположений о распределениях плотностей тепловых потоков.

Рассмотрим задачу математического описания процессов нагрева обрабатываемого цилиндрического изделия при металлообработке (рис. 1).

Постановка задачи теплопроводности:

* Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (проект № 16.740.11.0254) и ФЦП «Развитие научного потенциала высшей школы на 2009-2010 годы» (проект № 2.1.2/4236) Министерства образования и науки РФ.

Алексей Андреевич Узенгер – к.т.н., доцент.

Александр Андреевич Узенгер – ассистент.

$$\frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta(r, z, t)}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$0 \leq r \leq R; 0 \leq z \leq l; t \geq 0,$$

где $\theta(r, z, t)$ – распределенная температура металлической заготовки, a – коэффициент теплопроводности; r, z – радиус и длина заготовки соответственно.

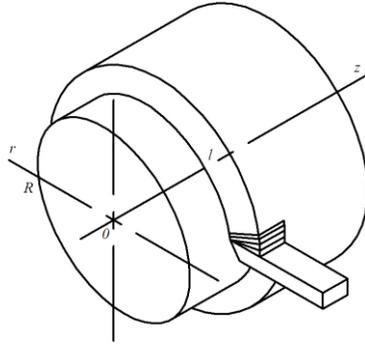


Рис. 1. К постановке задачи теплопроводности

Начальные условия:

$$\theta(r, z, t)|_{t=0} = \theta_0(r, z). \quad (2)$$

Граничные условия второго рода:

$$\lambda \frac{\partial \theta(0, z, t)}{\partial r} = 0; \lambda \frac{\partial \theta(R, z, t)}{\partial r} = q(z, t); \lambda \frac{\partial \theta(r, 0, t)}{\partial z} = 0; \lambda \frac{\partial \theta(r, l, t)}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $q(z, t)$ – тепловой поток в зоне фактического контакта резца и металлической заготовки.

Решение поставленной двумерной задачи (1) с начальными (2) и граничными (3) условиями в общем случае примет вид [2]

$$\theta(r, z, t) = 2\pi \int_0^l \int_0^R \xi \theta_0(\xi, \eta) G(r, z, \xi, \eta, t) d\xi d\eta + 2\pi a R \int_0^t \int_0^l q(\eta, \tau) G(r, z, R, \eta, t - \tau) d\eta d\tau, \quad (4)$$

где $G(r, z, \xi, \eta, t)$ – фундаментальное решение задачи (1)-(3) имеет вид

$$G(r, z, \xi, \eta, t) = \left[\frac{1}{l} + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi z}{l}\right) \cos\left(\frac{n\pi \eta}{l}\right) \exp\left(-\frac{a n^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \right] \cdot \left[\frac{1}{\pi R^2} + \frac{\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_0^2(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n r}{R}\right) J_0\left(\frac{\mu_n \xi}{R}\right) \exp\left(-\frac{a \mu_n^2 t}{R^2}\right) \right], \quad (5)$$

где μ_n – положительные корни трансцендентного уравнения $J_0(\mu) = 0$.

Выражение (4) позволяет построить температурное распределение металлической заготовки при металлообработке по внешнему диаметру. Применив преобразование Лапласа к функции Грина (5), получим, согласно теории систем с распределенными параметрами (СПП), распределенную передаточную функцию [3]. Распределенным входом является тепловой поток $q(\eta, \tau)$, а распределенным выходом является температурное поле цилиндрической заготовки $\theta(r, z, t)$.

При равномерном вращении цилиндрической заготовки и поступательном движении резца вдоль координаты z с постоянной скоростью $v = ds(\tau)/d\tau$ тепловой

поток, образуемый в месте контакта реза и металлической заготовки, согласно теории СРП, относится к классу подвижных управляющих воздействий [4]:

$$q(\eta, \tau, \eta - s(\tau)) = q_0(\eta, \tau) \psi[\eta - s(\tau), \sigma(\tau), \tau], \quad (6)$$

где $q_0(\eta, \tau)$ – интенсивность подвижного управления, мощность тепловыделения в зоне контакта реза и заготовки; $\psi[\cdot]$ – функция, описывающая форму пространственного распределения источника и ее изменение во времени; $s(\tau)$ – закон движения источника; $\sigma(\tau)$ – закон изменения параметров формы источника, определяющих степень пространственной концентрации его воздействия; τ – время.

При постоянном перемещении реза $v = const$, при неизменной форме источника, в первом приближении описываемой дельта-функцией, выражение (6) упрощается следующим образом:

$$q(\eta, \tau, \eta - s(\tau)) = q_0(\tau) \delta(\eta - s(\tau)). \quad (7)$$

Мощность тепловыделения в зоне контакта $q_0(\tau)$ может быть рассчитана по следующему выражению [5]:

$$q_0(\tau) = \frac{P(\tau)v}{A}, \quad (8)$$

где $P(\tau)$ – амплитудное значение динамической силы; v – скорость перемещения режущего инструмента; A – площадь фактического контакта.

Выражение (4) с учетом (7) и (8) позволяет получить информацию о пространственном распределении температурного поля при металлообработке на станках токарной группы в случае равномерного вращения режущего инструмента и постоянной скорости перемещения реза вдоль обрабатываемой поверхности. К недостатку данной математической модели следует отнести то, что она не учитывает отвод тепла от заготовки, за счет удаления стружки. Данный недостаток в первом приближении можно компенсировать введением поправочного коэффициента в выражении (8). При использовании же в технологии обработки изделия на станке смазочно-охлаждающей жидкости постановка задачи теплопроводности (1)-(3) коренным образом изменится, что приведет к более сложным результатам.

В работах некоторых исследователей показаны результаты, подтверждающие зависимость предела текучести обрабатываемого резанием материала от температуры и скорости деформации. Предметом изучения данного явления занимается термомеханика резания. В опытах Финни и Уолэка [1] при предварительном охлаждении обрабатываемой заготовки касательные напряжения в условной плоскости сдвига возрастали; доказывалась существенность влияния температуры деформации на предел текучести при резании. Это дает основание предположить, что при резании без предварительного подогрева или охлаждения касательные напряжения в зоне стружкообразования мало меняются не потому, что не зависят от температуры, а потому, что сама температура деформации в тех случаях изменялась в сравнительно узком диапазоне.

Определяющие уравнения для идеально пластического и упрочняемого материалов, применяющиеся в механике резания, могут рассматриваться как упрощенные частные случаи более общего определяющего уравнения, отражающего влияние на предел текучести χ деформации ε , скорости деформации ε' и температуры θ . Примером такого обобщенного определяющего уравнения служит функция вида

$$\chi = \chi_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'_0} \right)^{k\Delta\theta} \exp(-B\Delta\theta), \quad (9)$$

где $\Delta\theta = \frac{\theta - \theta_0}{\theta_{пл}}$ – приращение гомологической (безразмерной) температуры, $\theta_{пл}$ – температура плавления металла, $\theta_0 = 273$; ε_0 , ε'_0 , χ_0 – соответственно деформация, скорость деформации, предел текучести в условиях, принятых за базовые; m , k , B – показатели деформационного и скоростного упрочнения и температурного разупрочнения.

Рассмотрение закономерностей распространения тепла и его влияния на процессы обработки металлической заготовки имеет большое значение для понимания физической сущности и разработки более универсальных и точных методов расчета характеристик процессов резания и обработки. Фундаментальное решение (5) и уравнение (9), которое соответствует представлениям о преимущественном влиянии температуры и деформации на предел текучести при резании, позволяют представить процессы нагрева заготовки при металлообработке как объект управления СРП.

Точные модели процессов нагрева заготовки при металлообработке позволяют создать новые оптимальные системы управления процессами резания и обработки, которые обеспечивают: качественные показатели поверхностного слоя конечного изделия; гарантированное распределение температуры, напряжений и деформаций по заготовке; оптимальное значение параметра текучести для обрабатываемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Верещака А.С., Кушнер А.С.* Резание материалов. – М: Высшая школа, 2009. – 535 с., ил.
2. *Полянин А.Д.* Справочник по линейным уравнениям математической физики. – М.: Физматлит, 2001. – 576 с.
3. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с., ил.
4. *Рапопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.: ил.
5. *Штриков Б.Л., Калашников В.В.* Ультразвуковая сборка. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 300 с.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2010 г.

UDC 621.91

MODEL OF TEMPERATURE FIELDS IN A METAL WORKPIECE DURING MACHINING

Aleksey A. Uzenger, Alexander A. Uzenger

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of creating a model of the temperature fields for mechanical chemical treatment of metal blanks, with and without the yield point of the material on the temperature.

Keywords: *theory of heat conduction, the fundamental solution, thermal cutting, thermomechanics cutting, system with distributed parameters.*

*Aleksey A. Uzenger – Candidate of Technical Sciences.
Alexander A. Uzenger – Assistant.*