

УДК 621. 923

**В.С. Гусарев,**доцент,
Одесский
национальный
политехнический
университет

ШЛИФОВАНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Гусарев В.С. Шлифование и энергетическая теория. Предложена гипотеза физической аналогии трения и шлифования по конечному энергетическому результату.

Gusarev V.S. Grinding and the energy theory. It is proposed to the gipoteza fizicheskoy analogy of friction and grinding according to thee final energy result

Введение

В последние годы быстро развивается разработка методов проектирования и расчета процессов обработки деталей машин, в основу которых положен принцип минимума энергозатрат при современных требованиях качества. Нормированные показатели качества определяются технологической наследственностью[1]. Оценка эффекта технологической наследственности связана с наличием остаточных напряжений и определяется их величиной в поверхностных слоях деталей машин после абразивной обработки, например, шлифованием.

Энергетический подход, использованный для расчета энергоемкости операций абразивной обработки, в некоторой степени обобщает исследования, которые не противоречат общепризнанным теориям и успешно используются в теории трения и изнашивания деталей машин. Автор считает, что абразивная обработка, и в частности шлифование, есть процесс трения между существенно разнородными материалами, какими являются обрабатываемая деталь и абразивный инструмент (шлифовальный круг, брусок или шлифовальная лента). Шлифование представляет собой искусственно форсированный процесс трения с направленным активным «износом» - обработкой детали.

Использование методологии расчетов на трение позволяет:

1. Выявить требования к физико-механическим свойствам материалов, методам и режимам обработки шлифованием деталей с учетом заданных условий работы.

2. Выделить основные факторы, оказывающие наиболее значимое влияние на процесс технологической наследственности, т.е. на образование остаточных напряжений после шлифования.

3. На стадии проектирования расчетным путем определить ресурс машины, что позволит исключить её долгосрочные и дорогие испытания.

1. Абразивная обработка, как процесс трения

Энергетическая теория шлифования, рассматривающая процесс, как интенсивное трение между деталью (с заведомо меньшей твердостью) и инструментом (заведомо высокой твердостью), и отслаивание припуска, как интенсивное разрушение (изнашивание) детали, с той или иной точностью соответствует реальным процессам.

Это позволяет объединить существующие частные теории и объяснить многие противоречивые данные, опубликованные в литературе.

Теория разрушения, в основу которой положено чисто механическое взаимодействие поверхностей детали и абразивного инструмента, хотя и даёт какие-то весьма приближенные результаты, однако, не может учесть сопутствующие тепловые, электрические, магнитные и акустические явления и химические воздействия среды, смазки и материалов, которые оказывают существенное влияние и воздействие на этот процесс.

Энергетическая теория основана на закономерностях накопления внутренней энергии в поверхностных слоях материала. Отделение частиц материала зависит от некоторой критической (предельной) величины энергии, подводимой к материалу. Причем внутренняя энергия в материале может накапливаться как в процессе обработки (трения), так и когда её нет, за счет химического взаимодействия (энергообмена) с окружающей средой. Поэтому все процессы взаимодействий надо различать по следующим признакам:

1. Активные процессы, т.е. процессы при которых величина внутренней энергии растёт (деформация, химические реакции и т.п.).

2. Пассивные процессы, т.е. процессы, при которых внутренняя энергия поверхностных слоев материала детали уменьшается. Например, термообработка (отпуск), упрочнение за счет химического модифицирования поверхностных слоев и т.п.

Напряжения, возникающие в материале, имеют прямую связь с ее внутренней энергией [2].

Активные и пассивные процессы могут быть оценены по величине возникающих в материале растягивающих и сжимающих напряжений. Структуры кристаллической решетки могут служить мерой оценки энергетического состояния материала поверхностных слоев.

Если накопление энергии в материале (e) линейное, т.е. энергия, поглощаемая материалом за один цикл нагружения ($e = \text{const}$), тогда плотность энергии в материале поверхностного слоя, соответствующая критической, будет равна

$$E = e n p / V_{\text{виз}}, \quad (1.1),$$

где E - критическая энергоёмкость материала;

$V_{\text{виз}}$ – объем разрушения (снимаемый припуск);

$n p$ - число циклов (разрушения) шлифования.

Таким образом, величина слоя (снимаемого припуска) зависит от числа циклов шлифования, приводящих к разрушению. Этим объясняется физический смысл фрикционной усталости материалов, положенной в основу усталостной теории. В этом случае критическая энергоёмкость вполне характеризует и усталостные свойства материала.

По Б.И. Костецкому [2] процесс шлифования, как и трение можно представить следующим образом: шлифование подчиняется закону сохранения энергии, поэтому в соответствии с первым законом термодинамики его можно представить соотношением

$$A = Q + \Delta E, \quad (1.2),$$

где ΔE - изменение внутренней энергии материала;

Q - тепловой эффект при шлифовании;

A - работа процесса, эквивалентная затраченной механической энергии.

Изменение внутренней энергии шлифуемого материала равно величине энергии новых поверхностей, образующихся при разрушении, и энергии, аккумулированной в металле при взаимодействии поверхностей в виде скрытой энергии деформации.

Процесс шлифования материала является функцией *процессов деформации и разрушения*, поэтому его модель может базироваться на анализе средней величины энергии, поглощаемой материалом в этом процессе. Известно, что величина этой энергии зависит от внешних факторов и исходного состояния металла[3].

В процессе шлифования *происходит аккумуляция энергии упругой деформации* до предельной величины, что приводит к нарушению сплошности поверхности, т.е. отделению одной части кристаллической решетки от другой. При этом происходит разрыв межатомных связей и образование новых поверхностей. Эти явления требуют для своего осуществления определенных затрат энергии [4].

В общем виде энергия - работа шлифования ($E_{\text{ш}}$) затрачивается на разрушение (E_p) и увеличение запаса энергии в поверхностном слое металла в виде скрытой энергии деформации ($E_{\text{сд}}$), превращаясь в тепло (Q). Оно поглощается металлом и рассеивается в окружающую среду.

$$E_{ш} = E_p + E_{сд} + Q, \quad (1.3).$$

Энергия, расходуемая на разрушение (E_p), складывается из энергии на упругую деформацию (E_y), энергии сближения поверхностей (E_b), зарождения трещин (E_{zt}) и энергии, соответствующей работе приложенного напряжения при раскрытии трещины (E_{pt}) и эффективной энергии образования двух новых поверхностей ($2 E_n$):

$$E_p = E_y + E_b + E_{zt} + E_{pt} + 2 E_n. \quad (1.4).$$

В процессе относительного перемещения поверхностей металла он деформируется и образуются микротрещины, которые, развиваясь, приводят к разрушению поверхностных микрообъемов. В поверхностных участках, размеры которых зависят от состава и структуры материала, происходят необратимые процессы, которые изменяют его исходное состояние, происходит прирост плотности дислокаций, образование деформации, изменение параметров кристаллической решетки, выделение дисперсных фаз, образование остаточных напряжений. Твердое тело разрушается, если кристаллическая решетка перестает при нагружении поглощать подводимую извне энергию. Это означает, что данный объем металла насыщен энергией предельной величины, определяемой силами связи в его кристаллической решетке. Работа, затраченная на осуществление указанных изменений, приводит к увеличению запаса внутренней энергии поверхностных слоёв металла.

Скрытая энергия деформации ($E_{сд}$) представляет собой энергию, сосредоточенную в дислокациях (E_c), точечных дефектах ($E_{тд}$), образовавшихся в процессе шлифования и остаточных напряжений ($E_{вн}$), а также энергию структурных превращений ($E_{мп}$) и выделения новых фаз (E_f).

$$E_{сд} = E_c + E_{тд} + E_{вн} + E_{мп} + E_f \quad (1.5).$$

С повышением степени деформации количество энергии, аккумулируемой в металле, увеличивается и может колебаться в широких пределах от нескольких до сотен джоулей на 1 моль.

2. Энергия разрушения металлов.

Энергия процесса вдавливания индентора твердомера при измерении твердости и проникновении шероховатости абразивного контртела в поверхностные слои металла аналогичны, поэтому можно считать, что способность материала к сопротивлению сближения поверхностей контролируется теми же свойствами, которые характеризуют его твердость. Зная твердость рабочей поверхности материала после обработки (трения), можно определить работу, которую нужно совершить при вдавливании индентора на глубину съема (износа) за один рабочий цикл. Если принять, что проникновение индентора в поверхность происходит в результате преодоления сопротивления со

стороны металла, численно равного твердости, то затраченная при этом энергия вдавливания:

$$E_{\text{вд}} = H \Delta h S, \quad (2.1),$$

где H - твердость поверхностного слоя металла после обработки;

Δh - глубина вдавливания индентора в металл (величина съема износа за один рабочий цикл);

S - площадь сечения индентора на глубине вдавливания в металл на величину, равную съему (износу) за один рабочий цикл.

$$S = p \Delta h (2r - \Delta h) \quad (2.2),$$

при радиусе индентора $r = 1$ мм и малой глубине вдавливания за один рабочий цикл (обычно $\Delta h = 1,27 \cdot 10^{-5} \dots 1,3 \cdot 10^{-4}$ мм); при этом выражение в скобках может быть принято равным $2r$. Таким образом:

$$E_{\text{вд}} = 2p H \Delta h 2r \quad (2.3).$$

2.1 Энергия зарождения и развития трещин.

При перемещении инструмента по поверхности детали происходит деформация металла и образование микротрещин. Дальнейшее развитие микротрещин приводит к разрушению поверхностных микрообъемов, что и составляет акт отрыва частиц материала. Формально трещина может быть интерпретирована как скопление n краевых дислокаций с вектором Бюргера b , тогда энергия микротрещин $E_{\text{тр}}$ шириной $H = nb$ и длиной l составляет:

$$E_{\text{вд}} = \frac{n^2 b^2 E}{4\pi(1-\mu) \ln\left(\frac{4R}{l}\right)} + 2E_{\text{г}} l - \frac{\pi(1-\mu)l^2 \sigma^2}{8E} - \sigma n b l \quad (2.1.1),$$

где E - модуль упругости;

R - протяженность поля напряжений от вершины трещины;

$E_{\text{г}}$ - эффективная поверхностная энергия;

σ - приложенные напряжения, приводящие к образованию и развитию трещин;

μ - коэффициент Пуассона.

Первый член в выражении характеризует энергию $E_{\text{зт}}$, необходимую для образования трещины, и соответствует известному критерию зарождения трещин Гриффитса. Второй член представляет собой энергию, затрачиваемую на создание двух новых поверхностей. Третий член $E_{\text{с}}$ - упругая энергия трещины в поле приложенных напряжений. Энергия упругой деформации поверхностного слоя деформированного металла сосредоточена в тех искажениях кристаллической решетки, которые после снятия нагрузки реализуются

при восстановлении формы и размеров. Четвертый член в выражении - работа $E_{рт}$, производимая приложенным напряжением при раскрытии трещины.

При модуле сдвига G и векторе Бюргерса b истинная поверхностная энергия составляет $E_0 = 0,1 \sigma S b$ [3]. Площадь поверхности образующей трещины

$$S = 2 n b l. \quad (2.1.2).$$

Скопление дислокаций, образующих трещину, может быть принято $n = 500$. Таким образом, истинная поверхностная энергия трещины

$$E = 10^2 \sigma b^2 l, \text{ Дж} \quad (2.1.3).$$

2.2 Скрытая энергия деформации при обработке (трении).

В процессе пластической деформации металла часть механической энергии переходит в тепло, часть расходуется на преодоление сил межатомных связей и образования новых поверхностей и часть аккумулируется в металле. С увеличением степени пластической деформации величина аккумулируемой металлом энергии возрастает, повышая его внутреннюю энергию. Чем большей способностью запасать подводимую энергию обладает материал в данном структурном состоянии, тем выше должна быть его сопротивляемость разрушению при обработке. Скрытая энергия деформации при обработке (трении) складывается из величины энергии, сосредоточенной в дислокациях, дефектах упаковки и остаточных напряжениях, образовавшихся в процессе обработки (трении), а также из энергии образования и выделения новых фаз. Вклад в скрытую энергию деформации от дислокаций происходит как за счет энергии, связанной с энергией искажения кристаллической решетки, так и за счет энергии взаимодействия дислокаций друг с другом, от их расположения и расстояния между ними в деформированном объеме.

2.3 Энергия дислокаций.

Величина энергии, затрачиваемой на увеличение плотности дислокаций в данном объеме, может быть определена по разности плотности дислокаций до и после обработки (трения)

$$E_c = \Delta \rho E_p V_p, \quad (2.3.1),$$

где $\Delta \rho$ - прирост плотности дислокаций в рабочем объеме металла после обработки;

E_p - энергия единичной дислокации;

V_p - объём поверхностного слоя, в котором происходит увеличение плотности дислокаций

$$\Delta\rho = \int_0^{l_{\Delta\rho}} f(l_{\rho}) dl_{\rho} \quad (2.3.2).$$

Наличие дислокаций в кристалле приводит к появлению в нем деформаций - напряжений и, следовательно, к увеличению запасенной упругой энергии. Упругая энергия единичной дислокации E на единицу длины определяется по соотношению [5]:

$$E'_{\rho} = \frac{(\ln \frac{r_1}{r_0} - l_y) G b^2}{4\pi(1-\mu)} \quad (2.3.3),$$

где G - модуль сдвига;

b - вектор Бюргера;

μ - коэффициент Пуассона;

r_0, r_1 - внешний и внутренний радиусы силового поля единичной дислокации; r_1 может быть принят от 50 нм до 2 мкм; радиус ядра дислокации r_0 может быть принят от 8 нм до $b/3$;

E_p - энергия ядра дислокации принимается равной 10 % от E_s ;

l_p - глубина рабочего слоя.

Из вышеуказанного получим:

$$E_{\rho} = \frac{G b^2}{4\pi(1-\mu)} \ln\left(\frac{r_1}{r_0} - l_{\text{ш}}\right) V_{\rho} \int_0^{l_{\rho}} f(l_{\rho}) dl_{\rho} \quad (2.3.4).$$

Точный расчёт энергии взаимодействия дислокаций пока невозможен, так как её величина и знак зависят от трудно определяемых характеристик расстояния между дислокациями и наличия сегрегаций на дислокациях. Приближенная оценка энергии взаимодействия дислокаций по различным литературным данным равна для металлов приблизительно от 1 до 5 эВ на одно межатомное расстояние [5]. Вклад этого процесса в общую энергоёмкость металлов может достигать значительных величин.

2.4 Энергия разрушения межатомной связи

При механической деформации нарушение межатомной связи в предельно искаженной кристаллической решетке произойдет при сообщении ему энергии, численно равной величине скрытой теплоты плавления. Поскольку деформация при обработке (трении) происходит обычно при температуре меньшей, чем температура плавления, то величину энергии, затрачиваемой на разрушение межатомной связи, можно определить по уравнению Кирхгофа, описывающему изменение

теплоты реакции (плавления, полиморфных превращений и т.д.) с температурой:

$$L_u = L_{\bar{i}\bar{e}} - \int_{T_u}^{T_{\bar{i}\bar{e}}} \Delta C_p dT \quad (2.4.1),$$

где L_u - скрытая теплота плавления при температуре трения;

T_u - температура трения;

$T_{пл}$ - температура плавления;

ΔC_p - разность удельных теплоёмкостей в жидком состоянии и при температуре трения.

Поскольку тепловые колебания атомов способствуют нарушению межатомных связей, энергия, затрачиваемая на осуществление этого процесса в предельно искаженной кристаллической решетке, будет определяться, как энергия тепловых колебаний атомов, и составит:

$$E_{\delta\bar{e}} = L_u - \int_0^{T_u} C_p dT \quad (2.4.2),$$

где $\int_0^{T_u} C_p dT$ - энергия тепловых колебаний атомов.

Таким образом, при механическом нагружении удельная энергия нагружения межатомных связей в объемах материала с предельными статистическими искажениями составит:

$$E_{\delta\bar{e}} = L_{\bar{i}\bar{e}} - \int_{T_u}^{T_{\bar{i}\bar{e}}} \Delta C_p dT - \int_0^{T_u} C_p dT \quad (2.4.3).$$

2.5 Энергия выделения новых фаз.

Значительная хрупкость и малая способность к пластической деформации позволяет с некоторым допущением считать состояние кристаллической решетки карбидов аналогичным состоянию предельно искаженной кристаллической решетки пластических материалов. Эта схема позволяет применить известную методику [5] к расчету величины энергии, необходимой для разрушения карбидов, боридов, нитридов и окислов в износостойких сплавах. При деформировании поверхностных слоев металла из твердого раствора поверхностной зоны происходит выделение дисперсных фаз. Зная общее количество карбидов, выделяющихся в результате деформации, можно оценить затраты энергии

на осуществление этого процесса. Если V -объем металла, в котором происходит выделение карбидов; k -максимальное количество карбидов, выделившихся на поверхности; $k = f(l)$ - характер распределения выделившихся карбидов по глубине слоя l , то количество энергии, затрачиваемой на выделение новых фаз, может быть определено по выражению:

$$E_k = EV \int f(l) dl, \quad (2.5)$$

где E - удельная энергия выделения карбидов; $E \approx 4,2$ кДж/моль

2.5.1 Энергия образования мартенсита деформации.

Для образования кристаллов мартенсита в металле с исходной аустенитной структурой, необходимы затраты энергии на упругую и пластическую деформации, образование поверхности частицы и отрыв решеток мартенсита и аустенита. Источник этой работы - разность свободных энергий исходной и конечной фаз. Количество энергии, затраченной на мартенситные превращения в процессе трения, может быть определено следующим выражением:

$$E_m = E V \int f(l) dl, \quad (2.5.1),$$

где E_m - энергия, необходимая на образование 1 моля мартенсита, $E = 2,1$ кДж/моль;

V - объем металла, в котором происходит образование мартенсита;

$f(l)$ - количество мартенсита и его распределение в зоне деформации по глубине l рабочего слоя, в котором рентгеноструктурным анализом отмечаются мартенситные превращения.

2.6 Энергия остаточных напряжений при обработке

В процессе обработки (трения) в рабочем слое сплавов происходят структурные превращения, сопровождающиеся объемными изменениями, которые вызывают появление остаточных напряжений. Кроме того, в поверхностном слое металла при его деформации создаются напряжения за счет искажений кристаллической решетки. Энергия, накопленная в металле в процессе деформации, представляет собой потенциальную энергию смещения атомов из их равновесного положения в кристаллической решетке. Возникшие напряжения стремятся вернуть смещенные атомы в их исходное положение.

Количественная оценка влияния остаточных напряжений в поверхностном слое определяется величиной работы из соотношения:

$$A = (1 - 2\mu) (3\mu\sigma)^2 / 6E \quad (2.7).$$

Если известен прирост величины остаточных напряжений на поверхности детали

$$\Delta \sigma = \int_0^{l_{\sigma}} f(l_{\sigma}) dl_{\sigma}, \quad (2.7.1),$$

об'єм металу V_{σ} , в якому утворюються залишкові напруження і характер їх розподілу по глибині робочого шару, то енергія, зосереджена в цих напруженнях, може бути визначена за формулою

$$E_{\text{вн}} = \frac{1-2\mu}{6E} (3\Delta\sigma)^2 V_{\sigma} \int_0^{l_{\sigma}} f(l_{\sigma}) dl_{\sigma} \quad (2.7.2).$$

Вывод.

Енергоємність процесу абразивної обробки визначається сумарною величиною енергії, поглиняемою при взаємодії абразивного інструмента з поверхнею деталі.

Енергетичний метод дослідження дозволяє встановити розміри витрати енергії на виконання процесів абразивної обробки, відповідно до явищ, що відбуваються в металах [6]. Таким чином, оцінити удельний внесок кожного з них на процес формування внутрішніх залишкових напружень в деталі, що в свою чергу забезпечить якість, визначається технологічною спадковістю процесу обробки.

Литература

1. Маталин А.А. Якість поверхні і експлуатаційні властивості деталей машин. – М.: Машгиз, 1956. - 252 с.
2. Костецкий Б.И., Линник Ю.И. Исследование энергетического баланса при внешнем трении металлов // ДАН СССР, Т.183.-1968. -N 5. с.52-55.
3. Крагельский И.В., Ямпольский Г.Я. О механизме абразивного износа //Известия вузов. Физика, 1968.-N 11. с.81-87.
4. Греггер Г., Кобольд Г. Расчет износа на основе гипотезы аккумуляции энергии при трении / Исследования по триботехнике. - М.: ВНИИМаш, 1975. с.187-195
5. Фридель Ж. Дислокации. Пер. с англ. - М.: Мир, 1967. -644 с.
6. Проников А.С. Надежность машин.- М.:Машиностроение,1978.- 592 с.

Надійшла до редакції 26.01.2015