

УДК 621.891

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

© Али Юсупович Албагачиев¹⁾, Махмуд Абдулахович Махмудов²⁾,
Юсуп Алиевич Албагачиев²⁾

¹⁾ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

²⁾ Московский государственный университет приборостроения и информатики.
Москва, Россия

albagachiev@yandex.ru

Аннотация. Предлагаются модели, связывающие удельную подводенную энергию, энергоемкость, время и температуру на контакте, которые могут быть использованы при расчете рациональных режимов механической, отделочной обработки и эксплуатации деталей машин, а также для прогнозирования долговечности при трении и изнашивании.

Ключевые слова: обработка, эксплуатация, режимы, температура, сила, скорость, времяподведеннаяэнергия, мощность, сдвиг, критерий, долговечность

SIMULATION MODES FOR PROCESSING AND EXPLOITATION OF MACHINE PARTS

A.Albagachiev, M. Makhmudov, Y. Albagachiev

Abstract. models are available that connect specific failed energy, intensity, time and temperature on contact, which can be used in the calculation of the rational modes of mechanical, finishing and maintenance machine parts, as well as to predict the longevity of friction and wear.

Keywords: processing, exploitation, modes, temperature, power, speed, time, podvedennaâ energy, power shift, criterion,

При обработке методами упрочняющей технологии и эксплуатации деталей машин на контактирующих поверхностях происходит упругопластическая деформация и разрушение. В процессе механической обработки и эксплуатации возникают силы трение и ударных взаимодействий. При этом в контактной зоне протекают циклические процессы деформации с изменением силы, скорости, температуры за время единичного контактирования.

С учетом единства процессов обработки и эксплуатации в основу моделирования нами положен термодинамический подход- поверхностный слой разрушается, если поглощенная его объемом энергия за некоторый промежуток времени достигает критической величины предельной, удельной внутренней энергии материала.

Для расчета рациональных режимов различных видов обработки и эксплуатации с учетом изменения силы и скорости за время контакта нами получено соотношение

$$n \int_0^{t_{\text{ц}}} P(t) V(t) dt / A \cdot h \geq [\tau] (1 - \theta / \theta_{\text{пл}}) \gamma \quad (1)$$

где n-количество контактов; t - текущее время; $t_{\text{ц}}$ – продолжительность цикла; $P(t)$ - результирующая сила; $V(t)$ – относительна скорость контактирующих тел; A , h -площадь и глубина контакта; $[\tau]$ -допустимое напряжение сдвига обрабатываемого материала; θ , $\theta_{\text{пл}}$ -

текущая температура и температура плавления обрабатываемого материала; γ -деформация при сдвиге.

Текущая температура θ рассчитывается согласно выбранной закономерности изменения мощности и переменного коэффициента распределения тепловой энергии α_T

$$\Theta(z, t) = \frac{(1 - \alpha_T) P V t}{A \lambda \Delta t \sqrt{\pi}} \left(1 - \frac{t}{\Delta t} \right) \left[2 \sqrt{at} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \right] \quad (2)$$

где z – координата; α – температуропроводность; Δt – полная продолжительность контакта.

Генерируемый на контакте тепловой поток распределяется между контактирующими поверхностями в зависимости от теплофизических и механических свойств материалов, коэффициента перекрытия и количества контактов. С учетом формулы Шаррона для вычисления α [1] и теплового баланса нами также выведена формула для расчета коэффициента распределения тепловых потоков при трении и ударе.

$$\alpha_T = \sum_{i=1}^n \alpha^i (\lambda_i, c_i, \rho_i) \quad (3)$$

где n – количество контактов при ударе или трении; i – текущий номер контакта; λ_i, c_i, ρ_i – соответственно теплопроводность, теплоемкость, плотность контактирующих материалов.

При любом способе механической обработки, трении и изнашивании реализуется какой-либо один из 4 случаев изменения мощности за время контактирования: параболический, постоянный, линейно возрастающий, линейно убывающий (Табл. 1).

Таблица 1

| Закономерности изменения силы и скорости резания за цикл | Схема изменения мощности обработки за время одного цикла | Способы лезвийной обработки | Энергия резания за время одного цикла |
|--|--|---|---------------------------------------|
| Сила и скорость за цикл постоянны по времени | Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Точение, растачивание, сверление, рассверливание, зенкерование, развертывание, протягивание, строгание, долбление и прочие способы обработки. | $W = N \cdot t$ |
| Сила монотонно возрастает, скорость постоянна | N Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Цилиндрическое, дисковое, торцовое фрезерование, фрезерование против подачи (встречное фрезерование) | $W = \frac{1}{2} N_{\max} \cdot t$ |
| Сила постоянна, скорость падает до нуля | N Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Цилиндрическое, дисковое, торцовое одностороннее фрезерование по подаче (попутное фрезерование) | $W = \frac{1}{2} N_{\max} \cdot t$ |

| | | | |
|--|---|---|----------------------|
| Сила возрастает до максимального значения, скорость от максим. значения снижается до нуля. |  | Разрезание, торцовое и концевое фрезерование дробеударное упрочнение | $W = 2/3 N_{\max} t$ |
|--|---|---|----------------------|

Для **алмазного выглаживания** при постоянстве силы и скорости с учетом влияния температуры обработки глубина упрочнения имеет вид:

$$h_{yn} = \frac{nPfv_t}{[\tau] \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{nl}}\right) A} \quad (4)$$

где n – количество проходов индентора до наступления перенаклепа; f – коэффициент трения; h_{ynp} – глубина упрочнения; θ – температура выглаживания; Из (4) можно определить количество проходов алмазного инструмента n , а также режимы выглаживания P или V для любых материалов.

Для **дробеструйной обработки** изменение мощности по времени удара дробинки выражается интегралом:

$$N = \int_0^{t_u} PV \left(\frac{t}{\Delta t} - \frac{t^2}{\Delta t^2} \right) dt = PV \frac{\Delta t}{6} \quad (5)$$

Глубина упрочнения при дробеструйной обработке примет вид:

$$h_{ynp} = \frac{nPVt / 6}{\sigma_p \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{nl}} \right) A} \quad (6)$$

Если энергию единичного удара дробинки выразить через коэффициент восстановления V/V_0

$$W = mV^2(1 - V/V_0)$$

то для определения количества ударов при заданной глубине упрочнения получим:

$$n = \frac{[\sigma_{sp}](1 - \frac{\theta}{\theta_{nl}}) Ah_{ynp}}{mV^2(1 - V/V_0)} \quad (7)$$

где V_0 , V – скорость дробинки до и после удара; m – масса дробинки; $[\sigma_{sp}]$ – допустимый предел прочности, A – площадь контакта.

При **ударном упрочнении** фасонным инструментом глубину упрочнения можно рассчитать по формуле

$$h_{ynp} = \frac{n \int_0^{t_u} P(t)V(t)dt}{[\sigma_{Bp}] \left(1 - \frac{\theta}{\theta_{nl}} \right) A} \quad (8)$$

Для **резания** при лезвийной и абразивной обработке, с учетом импульсности силы, нами предложена измененная зависимость (2):

$$n \int_0^l P dl / h V S t^1 \geq [\tau](1 - \theta/\theta_{nl}) \gamma \quad (9)$$

где; V -скорость резания; S -подача; t^1 -глубина резания.

Температура θ рассчитывается согласно выбранной закономерности изменения мощности обработки и переменного коэффициента распределения энергии по формуле(2). Сравнение режимов резания для обработки жаропрочного сплава, рассчитанных по формуле (9), с рациональными (эмпирическими) показал их удовлетворительное соответствие.

Эксперименты подтвердили[2] (для дробеударной обработки, ударного упрочнения фасонным инструментом) расчетные значения максимального количества ударов, дальнейшее превышение которого приводит к перенаклепу, ухудшению шероховатости и снижению микротвердости (разрушению) поверхностного слоя деталей машин. Для обеспечения требуемого качества и долговечности, и их прогнозирования при обработке и эксплуатации деталей машин в энергетических критериях режимы обработки и эксплуатации необходимо связать с видами разрушения. Разрушение осуществляется не только растяжением и сжатием, но и в результате среза, сдвига, отрыва и т.д. В табл. 2 приведены данные для приблизительной оценки удельной энергоемкости при различных случаях разрушения .

Таблица 2

| Вид разрушения | Энергия разрушения Дж | Удельная энергоемкость Дж/м ³ |
|----------------|--|---|
| Срез | $W_{cp} = \int_0^{e_{cp}} \tau_{cp} \cdot A \cdot de$ | $W_{\circ} = \frac{W_{cp}}{A \cdot e_{cp}} \approx \tau_{cp}$ |
| Растяжение | $W_p = \int_0^{e_{cp}} \sigma_{cp} \cdot A \cdot de$ | $W_{\circ} = \frac{W_p}{A \cdot e_{cp}} \approx \sigma_{cp}$ |
| Сжатие | $W_c = \int_0^{e_{cp}} \sigma_{cp} \cdot A \cdot de$ | $W_{\circ} = \frac{W_c}{A \cdot e_{cp}} \approx \sigma_{cp}$ |
| Сдвиг | $W_{cd} = \int_0^{e_{cp}} \tau_{cds} \cdot A \cdot de$ | $W_{\circ} = \frac{W_{cd}}{A \cdot e_{cp}} \approx \tau_{cds} \gamma$ |

Разработанные энергетические зависимости можно использовать для обеспечения заданного качества не только при обработке рассмотренными методами, но и при эксплуатации. При эксплуатации, в поверхностном слое деталей машин также происходит упруго – пластическое деформирование, упрочнение и затем разрушение (износ). Все рабочие поверхности деталей машин могут проходить через три периода изнашивания: приработки, установившегося и катастрофического износа. Основные виды изнашивания при трении: абразивный, механический, схватывание, адгезия, фреттинг – усталость. При ударе: ударно – усталостный, ударно – абразивный, ударно – тепловой, ударно – гидроабразивный. Сколько циклов до разрушения выдержит поверхностный слой материала зависит от энергоемкости деформируемого слоя и подведенной энергии. Например, удар рассматривается как процесс, состоящий из двух этапов - за время первого этапа начальная скорость падает до нуля, а сила возрастает до своего максимального значения, на втором этапе сила снижается до нуля, скорость отскока принимает некоторое значение. Теплообразование происходит на первом этапе удара при нагружении контакта. На втором этапе происходит упругая разгрузка. Сравнительный анализ величины энергии рассчитанной при импульсном нагружении и по номинальному ее значению показал их отличие в 6 раз.

Применительно к эксплуатационным процессам соотношение (2) примет вид

$$n \int_0^{t_u} P(t) V(t) dt / A \cdot h \leq W_3 \quad (10)$$

где W_3 – удельная энергоемкость материала.

Следует отметить, что удельную энергоемкость для деформируемого объема материала можно определить одним из пяти методов [3]. Подведенную энергию при различных видах изнашивания при трении или ударе необходимо определять в каждом конкретном случае. Таких случаев, (как и при обработке), может быть четыре. Выразим подведенную энергию при трении от мощности и времени и сведем их в (табл.3).

1 случай. Сила трения и скорость за время удара постоянны.

$$W = \int_0^{t_y} P f V dt = P f V \Delta t \quad (11)$$

2 случай. Сила трения за время удара возрастает и падает до нуля, а скорость постоянна.

$$W = \int_0^{t_y} P_{\max} f \frac{t}{\Delta t} V dt = P f V \Delta t / 2 \quad (12)$$

3 случай. Сила трения постоянна, а скорость за время удара линейно снижается.

$$W = \int_0^{t_y} P f V \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) dt = P f V \Delta t / 2 \quad (13)$$

4 случай. Сила трения и скорость за время удара возрастают и падают до нуля.

$$W = \int_0^{t_y} P f V \left(\frac{t}{\Delta t} - \frac{t^2}{\Delta t^2}\right) dt = P f V \Delta t / 6 \quad (14)$$

Для ударного изнашивания формула расчета энергии для всех 4 случаев имеют такой же вид, что и при трении, только в приведенных формулах будет отсутствовать коэффициент трения f .

Таким образом, предлагаемый энергетический подход может найти практическое применение при расчетах циклов разрушения для различных случаев трения, удара и изнашивания.

Если критерий (10) меньше 1, то имеем многоцикловое разрушение. Количество циклов до разрушения можно определить по формуле:

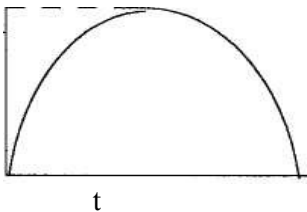
$$n = 6W_3 / P V \Delta t \quad (15)$$

Если (10) больше 1, то имеет место малоцикловое разрушение деформируемого объема. В этом случае время до разрушения за один цикл можно определить по аналитической зависимости.

$$\Delta t = 6W_3 / P V \quad (16)$$

Формулы были проверены при проведении экспериментальных исследований ударного упрочнения седел криогенной арматуры изготовленных из стали 12X18H10T и серого чугуна СЧ25. Количество ударов необходимых для достижения максимального упрочнения (при заданной подведенной энергии $W=6$ Дж) по расчетам составил: для стали 30 ударов; для серого чугуна 12; для высокомарганцовистых чугунов 6.

Таблица 3

| Закономерности изменения силы и скорости за время одного цикла | Схема изменения мощности за время одного цикла | Условия эксплуатации | Работа за время одного цикла |
|---|---|---|---|
| Сила и скорость за цикл постоянна по времени | N Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Стационарное трение и установившийся износ. Детали подшипников скольжения, качения и т.д. | $W = PVf \cdot t$ |
| Сила возрастает монотонно, а скорость возрастает мгновенно, а затем она постоянна | N Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Реверсивное трение, соприкосновение вращающейся поверхности с неподвижной и т.д. | $W = f P_{\max} V \cdot \frac{t}{\Delta t} \cdot t$ |
| Сила постоянна, скорость падает до нуля | N Ошибка! Источник ссылки не найден. t | Трение в фрикционных парамногодисковых тормозах самолета, автомобиля, ж.д. транспорта. | $W = f P V (1 - t/\Delta t)t$ |
| Сила возрастает до максимального значения, а скорость от максимума снижается до нуля. | N  t | Детали машин подвергающиеся удару, ударному изнашиванию. Отбойные молотки, перфораторы, пневмоударники. | $W = P V \cdot \frac{t}{\Delta t} \cdot \frac{t}{\Delta t}$ |

Дальнейшее увеличение количества ударов или времени обработки приводит к перенаклепу поверхностного слоя. При обработке или эксплуатации хрупких материалов в критерий вместо поглощенной энергии следует подставить поверхностную энергию. [2].

В заключении отметим, что на основе энергетической концепции разработаны простейшие модели для расчета режимов механической и отделочной обработки, а также режимов эксплуатации деталей машин с учетом изменения сил, скоростей и температур за время динамического контактирования.

Список литературы

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) /под ред. В.Чичинадзе, М.: Машиностроение, 2003.-576с.
2. А.Ю. Албагачиев, В.В.Зуев. Эффективные технологические методы обеспечения качества деталей машин. М.: МГУПИ, 2013. 124с.
3. Л.Л.Фадеев, А.Ю.Албагачиев Повышение надежности деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 97с.
4. А.Л.Воронцов, А.Ю.Албагачиев, Н.М.Султан-заде. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении.-Старый оскол: Тонкие наукоемкие технологии. 2013. 552 с.