

Затем после преобразования найдем производную длину дуги переходной кривой по параметру  $\gamma$ :

$$\begin{aligned} ds_F/d\gamma &= [(x_t')^2 + (y_t')^2]^{1/2} = (x_{t0}' - \varphi' x_{t0} \operatorname{tg} \gamma) / \sin \gamma = \\ &= -m p_f^* / [\cos^2 \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^{3/2}] - x_c^2 / (r \cos^3 \gamma) - 2m p_f^* x_c / [r \cos^2 \gamma (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^{1/2}] + \\ &+ m p_f^* x_c / [r \cos^2 \beta \cos^2 \gamma (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^{3/2}] + m^2 p_f^{*2} \operatorname{tg}^2 \beta \cos \gamma / [r (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^2]. \end{aligned}$$

Итак, длина дуги переходной кривой между точками  $L_i(\gamma_i)$  и  $L_{i+1}(\gamma_{i+1})$  при  $\gamma_i > \gamma_{i+1}$  выразится так:

$$\begin{aligned} s_{F(i,i+1)} &= \int_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}} [(x_t')^2 + (y_t')^2]^{1/2} d\gamma = \\ &= \{(-m p_f^* x_c \cos \beta / r) F(u, \sin \beta) - (m p_f^* / \cos \beta) (1 - (x_c / r)) E(u, \sin \beta) - \\ &- (x_c^2 / 2r) [(\sin \gamma / \cos^2 \gamma) + \ln |\operatorname{tg}(\pi/4 + \gamma/2)|] - m p_f^* x_c \operatorname{tg} \gamma / [r(1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^{1/2}] + \\ &+ (m^2 p_f^{*2} / 2r) [(\operatorname{tg}^2 \beta \sin \gamma) / (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma) + \operatorname{tg} \beta \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \beta \sin \gamma)]\} \Big|_{\gamma_i}^{\gamma_{i+1}}, \end{aligned}$$

где  $E(u, \sin \beta)$  и  $F(u, \sin \beta)$  – неполные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно;  $u = \arcsin\{\sin \gamma / [\cos \beta (1 + \operatorname{tg}^2 \beta \sin^2 \gamma)^{1/2}]\}$ .

В частном случае при  $\beta = 0$  длина дуги переходной кривой

$$\begin{aligned} s_{F(i,i+1)} &= -m p_f^*(\gamma_{i+1} - \gamma_i) - (x_c^2 / 2r) [\sin \gamma_{i+1} / \cos^2 \gamma_{i+1} - (\sin \gamma_i / \cos^2 \gamma_i) + \ln |\operatorname{tg}(\pi/4 + \gamma_{i+1}/2)| - \\ &- \ln |\operatorname{tg}(\pi/4 + \gamma_i/2)|] - m p_f^* x_c (\operatorname{tg} \gamma_{i+1} - \operatorname{tg} \gamma_i) / r. \end{aligned}$$

Уравнение эвольвенты в прямоугольной системе координат ОХУ можно записать в таком виде

$$x_t = r_y \cos(\psi_b - \operatorname{inv} \alpha_y), \quad y_t = r_y \sin(\psi_b - \operatorname{inv} \alpha_y),$$

где  $r_y$  – радиус соосной окружности, проходящей через точку М эвольвенты;  $\alpha_y$  – угол профиля эвольвенты в точке М.

Дифференциал длины дуги эвольвенты:

$$ds = r_b (\sin \alpha_y / \cos^3 \alpha) d\alpha_y = r_b v_y dv_y = (r_b / r_y) dr_y = (r_y / r_b) dr_y.$$

Длина эвольвентной части профиля от точки А до точки L:

$$s_{AL} = r_b (\operatorname{tg}^2 \alpha_y - \operatorname{tg}^2 \alpha_1) / 2 = r_b (v_a^2 - v_l^2) / 2 = (r_a^2 - r_l^2) = r_b (\rho_a^2 - \rho_l^2) / 2.$$

Полученные уравнения позволяют вычислить длину всего торцевого профиля  $F_S F_L A A' L' F_S'$  зубьев цилиндрических эвольвентных колес

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андожский В.Д. Расчет зубчатых передач. – М.-Л.: Машиз, 1995.
2. Левковский Е.Н. Построение торцевого профиля зубьев цилиндрических эвольвентных колес. // Методические материалы по вопросам преподавания прикладной механики и основ конструирования машин. – Минск, 1991.

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ АМОРФИЗАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

М.Н.Верещагин, Р.И.Вечер, Д.Л.Стасенко

Гомельский политехнический институт им. П.О.Сухого (Гомель)

Развитие теории неразрывно связано с совершенствованием известных и разработкой новых способов и устройств, обеспечивающих расширение технологических возможностей процессов формообразования изделий, повышением производительности, снижением материалоемкости при одновременном целенаправленном формировании свойств получаемой продукции.

Для изучения параметров объекта исследования применялись известные методы: измерение микротвердости, анализ фазовых структурных превращений, определение остаточно-

го аустенита, исследование величины и знака остаточных напряжений и исследования, связанные с определением износостойкости. Для этих целей использовались приборы: прибор измерения микротвердости ПМТ-3, УРС-50ИМ - определения рентгеновским методом с помощью дифрактометра остаточного аустенита, МИМ-8 - металлографического анализа микроструктур, большой инструментальный микроскоп БИМ-1, стенд для испытаний на износостойкость и механический метод Н.Н.Давиденкова для определения остаточных напряжений.

В условиях газотермического напыления температурное поле затвердевающего расплава не является стационарным, т.к. покрытие формируется наращиванием расплавленных частиц на ранее затвердевшие. При этом высокие скорости охлаждения расплавленного материала, которые сопровождают данный процесс, обеспечивают при определенных условиях формирование метастабильных кристаллических и аморфных фаз. Повышение скорости охлаждения и затвердевания расплава значительно улучшают структуру, качество и физико-механические свойства сплавов.

Рассмотрим объем расплава, ограниченного поверхностью  $X = 0$ , при температуре  $T_H$ . В момент времени  $X = 0$ , когда температура на поверхности  $X = 0$  мгновенно падает до величины  $T_0$ , то образуется плоский фронт кристаллизации  $\xi = \xi(t)$ . Координата  $\xi(t)$  - граница раздела двух фаз, причем при  $x > \xi$  имеет место твердая фаза с температурой  $T_1$ ,  $C_{ps}$ ,  $\lambda_s$ ,  $a_s$ ; при  $x < \xi$  - жидкая фаза с температурой  $T_2$ ,  $C_{pL}$ ,  $\lambda_L$ ,  $a_L$ . Теплофизические характеристики не зависят от температуры, а плотность жидкой и твердой фазы равна  $\rho$ .

Распределение температуры в твердой и жидкой фазах описывается уравнениями теплопроводности.

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; \quad \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_L \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}; \quad (1)$$

На движущейся поверхности фронта кристаллизации имеем два граничных условия

$$T_1(\xi) = T_2(\xi) = T_{пл}$$

$$\lambda_s \left( \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\xi} - \lambda_L \left( \frac{\partial T_2}{\partial x} \right)_{x=\xi} = \rho \cdot \rho_1 \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2)$$

где  $\rho_1$  - удельная теплота кристаллизации сплава.

Общее решение уравнений (1) при граничных условиях (2) записывается в виде

$$\Theta_1 = \frac{\Theta_{пл}}{\operatorname{erf}(k)} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2} \sqrt{a_s t}\right)$$

$$\Theta_2 = \Theta_H - \frac{\Theta_H - \Theta_{пл}}{\operatorname{erfc}\left(\frac{K}{\sqrt{a_s t a_L}}\right)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2} \sqrt{a_L t}\right) \quad (3)$$

где  $\Theta_1 = T_1 - T_0$ ;  $\Theta_2 = T_2 - T_0$ ;  $\Theta_{пл} = T_{пл} - T_0$ ;  $\Theta_H = T_H - T_0$ .

Здесь коэффициент  $K$  определяет скорость продвижения фронта затвердевания.

Дифференцирование уравнений (3) по времени дает выражение для скорости охлаждения.

Полученные соотношения позволяют изучать тепловые условия при затвердевании частиц в зависимости от технологических условий процесса. Для определения коэффициента необходимо представить равенства (3) в граничное условие (2) на фронте затвердевания, после чего решить характеристическое уравнение.

Увеличение объемного содержания аморфной фазы в покрытии приводит к повышению ряда его служебных свойств. Поэтому для разработки технологических основ получения аморфизированных газотермических покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками необходимо изучать факторы, способствующие образованию аморфных фаз при напылении. Кинематическим параметром склонности сплава к аморфизации при быстрой закалке из расплава является критическая скорость охлаждения  $V_{кр}$ , необходимая для предотвращения образования кристаллической фазы, которая может быть найдена из выражений (3). Газотермическое покрытие формируется путем наращивания быстрозакаленных частиц, причем по мере увеличения его толщины, скорость охлаждения новых наносимых частиц уменьшается.

Специфика газотермического покрытия, формируемого путем наращивания быстрозакаленных частиц, позволяет рекомендовать его применение для покрытия трущихся пар, для упрочнения режущего инструмента и вообще для деталей машин, работающих в условиях

износа.

Высокая стоимость и дефицит применяемого в промышленности республики быстрорежущего и твердосплавного инструментов определяют необходимость поиска новых методов его изготовления, упрочнения, повышения надежности и долговечности.

Указанные обстоятельства являются посылкой для использования газотермического напыления, прежде всего для изготовления режущего инструмента на принципиально новой основе на счет наращивания быстрозакаленных частиц аморфизированных металлических сплавов.

Поэтому анализ условий аморфизации металлических сплавов при газотермическом напылении является одним из наиболее важных вопросов изучения методов упрочнения и изготовления режущих инструментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коржик В.Н. Теоретический анализ условий аморфизации металлических сплавов при газотермическом напылении. I. Определение скоростей охлаждения дисперсного напыления материала // Порошковая металлургия. - 1992 - №9 - с.56-61.
2. Коржик В.Н. Теоретический анализ условий аморфизации металлических сплавов при газотермическом напылении. II. Изучение фазообразования при затвердевании напыленного материала // Там же. - №10 - с.11-15.
3. Коржик В.Н. Теоретический анализ условий аморфизации металлических сплавов при газотермическом напылении. III. Превращения в аморфизированном слое в процессе наращивания покрытия // Там же. - №11 - с.47-52.
4. Демиденко Л.М. Высокоугнеупорные композиционные покрытия. М.: Металлургия, 1979.

### ТЕРМОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

В.Л.Потеха, И.С.Напреев, С.В.Петров

Белорусский государственный университет транспорта (Гомель)

Надежная эксплуатация транспортной техники, в том числе и железнодорожного тягового подвижного состава, во многом зависит от состояния трущихся сопряжений (Рис. 1). Физические основы работы таких узлов связаны с рассеянием энергии, что, в свою очередь, может быть использовано для оценки технического состояния трибосопряжений путем применения методов термодинамической диагностики.

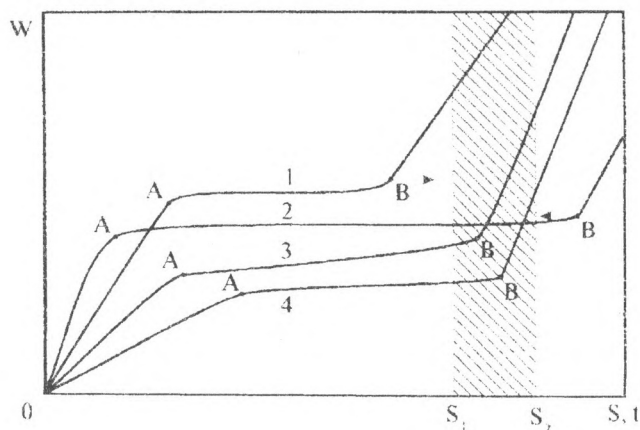


Рис. 1. Диаграмма износа трибосопряжений транспортной техники.  $W$  — Износ трибосопряжений;  $S, t$  — пробег, время работы узлов;  $A$  — окончание приработки, переход к стационарному (установившемуся) изнашиванию;  $B$  — переход к катастрофическому изнашиванию;  $S_1, S_2$  — зона оптимального ремонта.

устройством для измерения износа, которые с максимальной эффективностью могут быть использованы в качестве элементов диагностических систем и комплексов. Принцип действия таких систем заключается не только в контроле за изнашиванием трибообъектов, но, по необходимости, и в управлении этим процессом при помощи специальных поддерживающих устройств (А. с. 1655581. Рис. 3). Предложенные конструктивные решения и методика термодинамической диагностики трибосопряжений транспортной техники (А.с. 1490587) позво-

Системные лабораторные исследования самых разнообразных трибосистем, проведенные с использованием машин трения СМТ-1 и прецизионного анализатора износа PCLW-01, позволили установить существование линейной зависимости между температурным состоянием и изнашиванием трущихся узлов. Так, например, для пары вал (сталь ШХ-15) — вкладыш (бронза Бр05Ц5С5) при скорости скольжения 0.16 м.с, нагрузке от 0.05 до 0.29 МПа и испытании в режиме трения без смазочного материала в течение 3.6 кс связь между износом и температурой нагрева представлена на Рис. 2.

Проведение исследования и их результаты послужили базой для разработки новых конструкций подшипников скольжения (А.с. 1323777, 1388761, 1732021) с