

Э.С. Уманский, В.В. Кречков, Н.С. Шидловский,
Н.В. Скрипник, О.И. Бабич, В.В. Будкевич, В.И. Булгаков

ОЦЕНКА ЦЕЛОСТНОСТИ РУЛОНА МАГНИТНОЙ ЛЕНТЫ
ПРИ РАБОТЕ В СТАРТ-СТОПНОМ РЕЖИМЕ

Получено выражение для дополнительного радиального напряжения, возникающего в рулоне магнитной ленты за счет действия центробежных ускорений. Приведено графическое выражение максимально допустимого уровня полей остаточных сжимающих напряжений в рулоне, обеспечивающих его целостность при работе в старт-стопном режиме.

В современных лентопротяжных механизмах (ЛПМ) рулоны магнитной ленты эксплуатируются при воздействии значительных центробежных и окружных ускорений. Так, при ускоренной перемотке ленты, ее линейная скорость может достигать 6-9 м/с. Время пуска (старта) при записи-воспроизведении для ЛПМ без промежуточных накопителей изменяется от 0,5 до 3 с, а время остановки (стопа) для лучших образцов не превышает 15 мс [1]. Недостаточное натяжение магнитной ленты при намотке рулона, предварительные температурные или вибрационные воздействия могут привести к ослаблению сжимающих напряжений, обеспечивающих целостность рулона. При воздействии окружных нагрузок на ослабленные рулоны слои ленты проскальзывают относительно друг друга, образуя поперечные складки, царапины рабочего слоя и другие необратимые дефекты. Кроме того, растягивающие радиальные напряжения, воздействующие на рулон при его вращении, снижают уровень первоначальных сжимающих напряжений и также способствуют нарушению целостности рулона. Поэтому изучение явления разрушения рулона при работе в старт-стопном режиме с целью определения минимально допустимого уровня полей остаточных сжимающих напряжений в рулоне, обеспечивающих его целостность, представляет большой интерес.

Напряженное состояние рулона определяется остаточными радиальными и тангенциальными напряжениями σ_r и σ_θ , возникающими в процессе намотки, а также дополнительными нормальными (σ_r^ω и σ_θ^ω) и касательными ($\tau_{r\theta}^\omega$) напряжениями, возникающими при воздействии центробежных и окружных ускорений. В дальнейшем индексом ω будем обозначать напряжения деформации и перемещения рулона, вызванные действием центробежных и окружных ускорений. Поля остаточных напряжений, обусловленных тем или иным режимом намотки магнитной ленты,

определены в работе [2]. Для абсолютно жесткого сердечника без учета реологических свойств ленты [2] получено следующее выражение для радиального напряжения:

$$\sigma_r = -\frac{H_0}{\delta h} \frac{1}{(n+1)^2 - \beta^2} \left\{ \Omega_n \left[\left(\frac{\rho}{K} \right)^{\beta-1} - \left(\frac{K}{\rho} \right)^{\beta+1} \right] + (n+1) \left[K^n \left(\frac{K}{\rho} \right)^{\beta+1} - \rho^n \right] \right\}. \quad (1)$$

Здесь

$$\Omega_n = \frac{[K^{\beta+1+n}(\beta + \mu_{\theta r}) - \mu_{\theta r}](n+1) + \beta^2}{K^{\beta+1}(\beta + \mu_{\theta r}) + K^{1-\beta}(\beta - \mu_{\theta r})}; \quad (2)$$

$\rho = r/a$ - относительный радиус намотки;

r - текущий радиус намотки;

a - радиус сердечника;

b - внешний радиус намотанного рулона;

$K = b/a$;

H_0 - натяжение ленты при $r = a$;

n - показатель степени в выражении для изменения усилия натяжения ленты в процессе намотки $H(r) = H_0 (r/a)^n$;

δ - толщина ленты;

h - ширина ленты;

$\beta^2 = E_{\theta}/E_r$;

E_{θ}, E_r - модули упругости рулона в окружном и радиальном направлениях;

$\mu_{\theta r}$ - коэффициент Пуассона, характеризующий сокращение в радиальном направлении при растяжении в окружном направлении;

$\mu_{r\theta}$ - коэффициент Пуассона, характеризующий удлинение в окружном направлении при сжатии в радиальном направлении, причем $E_{\theta} \mu_{r\theta} = E_r \mu_{\theta r}$.

Определим напряжения, возникающие от окружных и центробежных ускорений. Как и ранее, считаем намотанный рулон магнитной ленты однородным цилиндрическим ортотропным диском, а сердечник рулона - абсолютно жестким телом. Поле окружных ускорений вызывает в сечениях $r = \text{const}$ касательные напряжения $\tau_{r\theta}^{\omega}$, определяемые из условия равновесия части рулона, расположенной между текущим радиусом r и $r = b$ (рис. 1). Используя принцип Даламбера и рассматривая упругое равновесие указанной части рулона, получим выражение для касательного напряжения, действующего на относительном радиусе $\eta = r/b$:

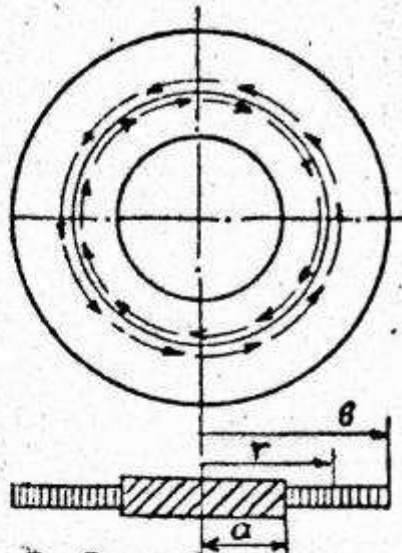


Рис. 1. Распределение внутренних усилий, возникающих при ускорении движения рулона.

$$\tau_{r\theta}^{\omega} = \frac{\gamma \cdot \beta^2}{4g} \cdot \frac{1 - \eta^4}{\eta^2} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3)$$

где ω - угловая скорость вращения рулона, зависящая от времени;

γ - вес единицы объема материала рулона.

Используя статические, геометрические и физические уравнения осесимметричной задачи плоского напряженного состояния при наличии центробежных сил,

получим разрешающее уравнение для радиального перемещения:

$$\frac{d^2 u^{\omega}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du^{\omega}}{dr} - \beta^2 \frac{u^{\omega}}{r^2} = - \frac{\gamma(\beta^2 - \mu_{\theta r}^2) \omega^2}{g E_0} r. \quad (4)$$

Решение этого уравнения нужно подчинить следующим граничным условиям:

1) на свободной поверхности рулона при $r = \beta$ отсутствуют радиальные напряжения $\sigma_r^{\omega} = 0$;

2) на границе рулона и сердечника при $r = a$ обеспечивается совершенный контакт (за счёт поля начальных напряжений σ_r), так что $u(a) = 0$. В результате получим следующее выражение для дополнительного радиального напряжения, возникающего за счёт действия центробежных ускорений:

$$\sigma_r^{\omega} = \frac{\gamma \omega^2 a^2}{g(9 - \beta^2)} \left\{ (\beta + \mu_{\theta r}) \frac{\beta - \mu_{\theta r} + K^{\beta+3}(3 + \mu_{\theta r})}{\beta - \mu_{\theta r} + K^{2\beta}(\beta + \mu_{\theta r})} \rho^{\beta-1} - (\beta - \mu_{\theta r}) \frac{\beta + \mu_{\theta r} - K^{3-\beta}(3 + \mu_{\theta r})}{\beta + \mu_{\theta r} + K^{-2\beta}(\beta - \mu_{\theta r})} \rho^{-\beta-1} - (3 + \mu_{\theta r}) \rho^2 \right\}. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены зависимости радиальных напряжений, полученные для рулонов магнитной ленты И-4406-6 с максимальным относительным радиусом намотки $K=2$. Зависимости построены с помощью выражения (5) при следующих механических константах материала рулона:

$\gamma = 0,16 \cdot 10^{-5} \text{ кгс/мм}^3$; $\beta^2 = 5,5$; $\mu_{\theta r} = 0,332$; $\beta = 90 \text{ мм}$. Эксплуатация рулонов, радиальные напряжения которых на соответствующих радиусах намотки меньше указанных на графике, при данных угловых скоростях может привести к нарушению целостности рулонов и, вследствие

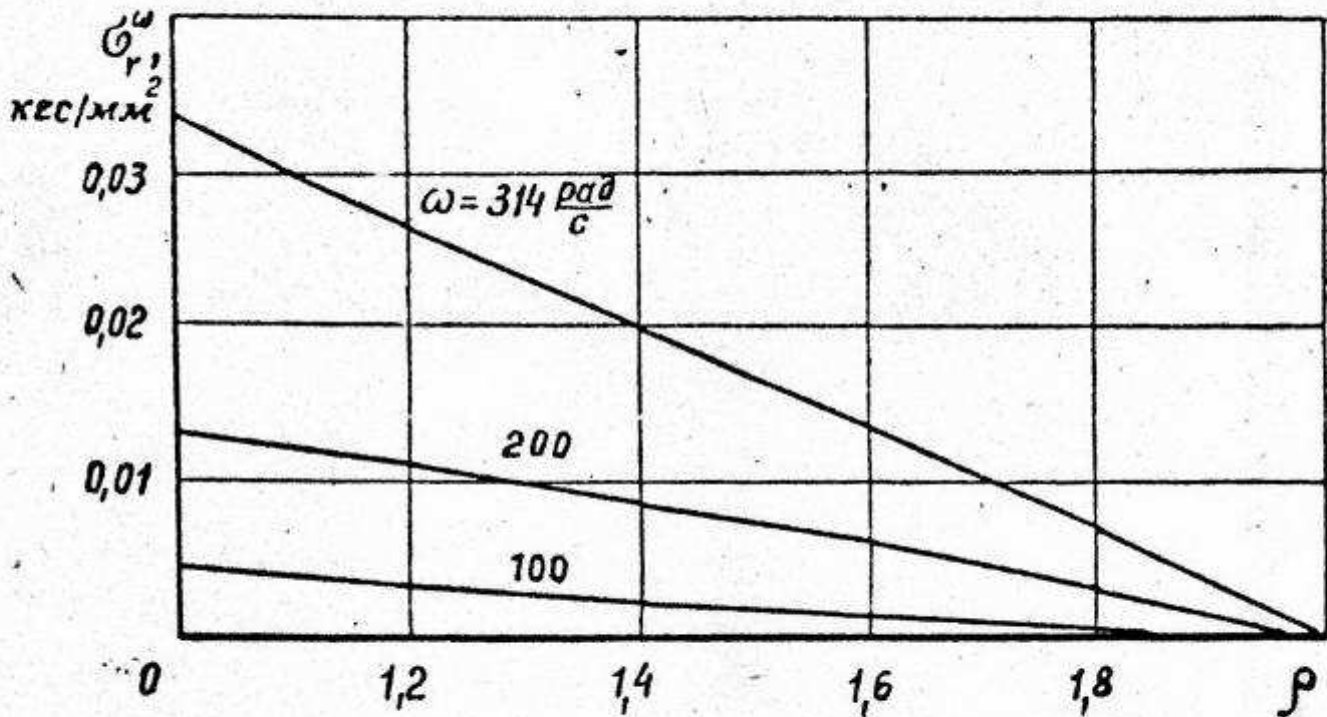


Рис. 2. Распределение радиальных напряжений, возникающих при вращении рулона магнитной ленты И-4406-6 с постоянной угловой скоростью.

этого, к потере записанной информации. Для оценки целостности рулонов, находящихся в поле действия окружных и центробежных нагрузок, можно использовать следующее условие:

$$\tau_{r\theta}^{\omega} \leq f_{тр} (\sigma_r - \sigma_r^{\omega}), \quad (6)$$

где $f_{тр}$ - коэффициент трения покоя пары рабочий слой-основа. Приведенное условие отражает тот факт, что сдвиг витков рулона произойдет лишь в том случае, когда касательные напряжения, появляющиеся в результате воздействия окружных ускорений, на каком-либо слое рулона превысят величину удельных сил межвиткового трения. Из условия целостности (6), при постоянном угловом ускорении $d\omega/dt = j = const$ получим выражение, позволяющее оценить величину остаточных радиальных напряжений, ниже которых возникает опасность расслоения рулона за счет сдвига витков:

$$\sigma_r^0 = j \frac{\gamma b^2 (1 - \eta^4)}{4g \eta^2 f_{тр}} + \sigma_r^{\omega}, \quad (7)$$

где σ_r^{ω} определяется по формуле (6). Как показывают эксперименты, в большинстве случаев расслоение наступает в области, близкой к сердечнику, на который намотан рулон, т.е. в области, где касательные напряжения $\tau_{r\theta}$ достигают максимального значения. Таким образом, для практических целей можно ограничиться определением минимально допустимых радиальных напряжений вблизи внутреннего радиуса рулона, т.е. при $\eta = a/b$.

На рис. 3 представлены графики зависимостей радиальных остаточных (намоточных) напряжений, при которых возникает опасность расслоения рулона, от углового ускорения при торможении рулона, построенные с помощью выражений (7), (6). При определении минимально допустимых уровней радиальных напряжений коэффициент межвиткового трения принимался равным 0,33 и $\eta = a/b = 1/2$.

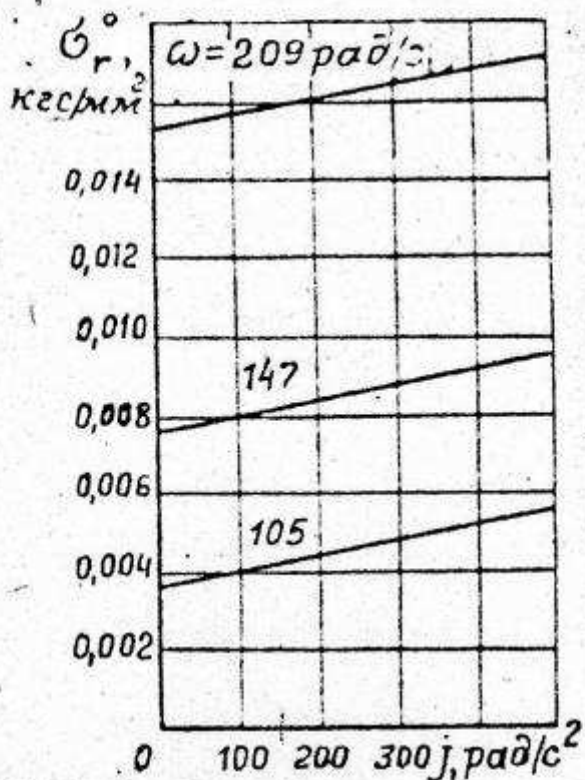


Рис. 3. Зависимость максимально допустимых остаточных напряжений в рулоне магнитной ленты И-4406-6 (К-2) от величины углового ускорения.

Литература

1. Травников Е.Н. Механизмы аппаратуры магнитной записи. - К.: Техника, 1976. - 464 с.
2. Уманский Э.С., Крычков В.В., Раковский В.А. К вопросу определения напряженного состояния магнитной ленты, намотанной в рулон. Проблемы прочности, 1978, №3, с. 43-49.

Статья поступила 11 апреля 1980 г.