

2. Релаксация энергии по различным механизмам связана со степенью свободы рассматриваемых системы и ее координатора.

3. Механизмы разрушения, которые реализуются на различных структурных уровнях, получают единое описание с точки зрения теории МИС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy von L., Beier W., Lane R. Biophysik des Fließgleichgewichts, Berlin. Akademie Verlag, 1977. – 157 S.

2. Mesarovic M. D., Takahara Y. General Systems Theory: Mathematical Foundation. – New York; London: Academic Press, 1975.

3. Mesarovic M. D., Masko D., Takahara Y. Theory of Hierarchical Multilevel Systems. – New York; London: Academic Press, 1970.

4. Миклашевич И. А., Асанович В. Я., Бурyleв Б. П. Микроскопические аспекты образования соединения при сварке взрывом // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 1991. – Т. 25. – С. 69–74.

5. Лихачев В. А., Панин В. Е., Засимчук Е. Э. и др. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / Под ред. В. В. Немошкаленко. – Киев: Наукова думка, 1989. – 320 с.

6. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. – М.: Наука, 1985.

7. Панин В. Е. Структурные уровни пластического деформирования. – Новосибирск: Наука, 1990.

8. Фридман Я. Б. Диаграмма относительной структурной неоднородности материалов // ДАН СССР. – 1956. – Т. 106. – № 2. – С. 258–261.

9. Шаняевский А. А. Ротационная неустойчивость деформации и разрушения металлов при распространении усталостных трещин на мезоскопическом масштабном уровне. I. Процессы пластической деформации в вершине трещины // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 73–80.

10. Novikova S. et al. Hierarchical Multilevel Systems in Aed Realization // Proceedings of 9th International Conference on Mathematical and Computer Modelling, ICMCM'93. – Berkeley, USA, 1993. – P. 71.

11. Novikova S., Miatliuk K., Gancharova S., Kaliada V. Aed Construction and Technology in Design // Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications, LSS'95. – London, UK, 1995. – P. 379–381.

12. Nowik W., Barkalin V. et al. Demographical units in hierarchical coordinates: Construction, activity and goals // Proceedings of the IFAC Conference on Supplementary Ways for Improving International Stability, SWISS'98, May 14–16. – Sinaia, Romania, 1998. – P. 95–100.

13. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

14. Черепанов Г. П. Квантовая механика разрушения // Проблемы прочности. – 1990. – № 2. – С. 3–9.

15. Миклашевич И. А., Асанович В. Я., Бурyleв Б. П. Вопросы микроскопической теории связи в биметаллических соединениях – Деп. в ВИНТИ № 4325-1389. – Краснодар, 1989. – 65 с.

16. Connecting atomistic and mesoscale simulations of cristal plasticity / Bulatov V., Abraham F., Kubin L., Devincte B., Yip S. // Nature (GB). – 1998. – V. 391. – № 6668. – P. 669–672.

17. Hideo Kobajashi. Micromechanics of crack growth // J. Jap. Soc. Proces. Eng. – 1988. – V. 54. – № 6. – P. 1035–1039.

18. Иванов В. Н. Синергетика деформирования и разрушения структурно-неоднородных твердых тел: Математический формализм // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов и конструкций: Сб. науч. тр. / УрО АН СССР. – Свердловск, 1989. – С. 3–13.

19. Shnirman M. G., Tyurina Y. A. Generalised hierarchical model of defect development and self-organised criticality // Phys. Rev. E. – 1998. – V. 57. – № 4. – P. 3804–3813.

20. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2-х т. / В. Е. Панин, В. Е. Егорушкин, П. В. Макаров и др. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 298 с.

Рецензент докт. физ.-мат. наук,  
проф. ЧИГАРЕВ А. В.

УДК 621.318.44.001

## АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ МЕРНОГО НАМОТА ПРОВОЛОКИ НА КАТУШКИ

Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ЕСЬМАН Г. А.,  
инж. КОЛЕСНИКОВ В. С., канд. техн. наук ФИЛИППОВ В. В., инж. ИСАКОВ С. А.

Белорусский национальный технический университет,  
РУП «Белорусский металлургический завод»

Повышение точности мерного намота проволоки на катушки для изготовления металлокорда, рукавов высокого давления или других подобных изделий – актуальная задача, так как в этих

случаях одновременно применяется большое количество нитей, и их разноразмерность на катушках приводит к безвозвратным потерям дорогостоящего сырья.

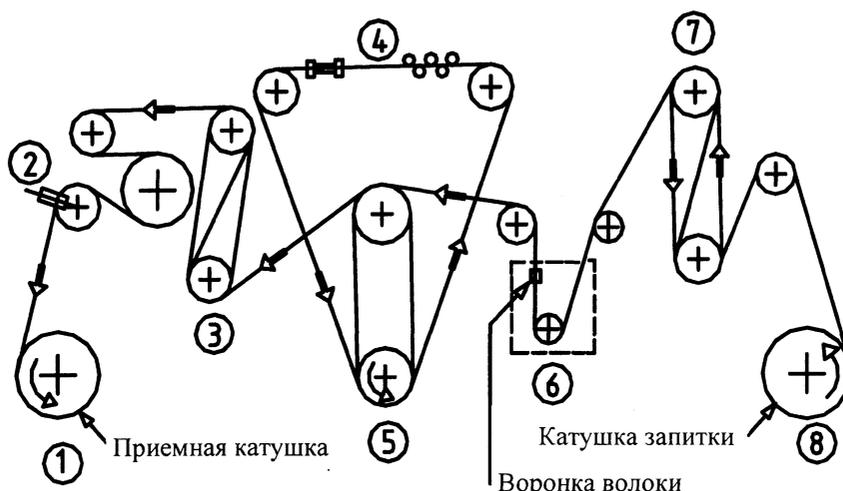


Рис. 1. Принципиальная схема намоточного станка: 1 – узел намотки; 2 – то же укладчика; 3 – промежуточный узел намотки; 4 – узел рихтовки; 5 – то же колонны барабана; 6 – то же опорной коробки волокна; 7 – промежуточный узел размотки; 8 – узел размотки

Используемое для этих целей оборудование относится к группе намоточных станков, которые широко применяются в промышленности и, в частности, на Белорусском металлургическом заводе (г. Жлобин) для изготовления обмоток различного назначения.

Принципиальная схема одного из таких станков представлена на рис. 1.

Проволока с катушки запитки, которая устанавливается на узел размотки при помощи подвижной и стационарной задней бабок, подается на промежуточный узел размотки, имеющий два направляющих ролика. Один из них связан с грузом и потенциометром, который должен обеспечить стабилизацию силы натяжения. При изменении по той или иной причине натяжения проволоки изменяются угловое положение рычага и, следовательно, выходной сигнал потенциометра. В зависимости от знака этого сигнала электропривод увеличивает или уменьшает крутящий момент на валу стационарной бабки так, чтобы стабилизировать усилие натяжения проволоки.

С промежуточного узла размотки проволока направляется на узел опорной коробки волокна, который предназначен для ее повторной калибровки (если проволока в повторной калибровке не нуждается, то узел не используется).

После калибровки проволока поступает на узел опорной колонны барабана. На входящие в состав этого узла ролики проволока наматывается в несколько витков (от двух до шести) таким

образом, чтобы в результате трения они обеспечивали ей без проскальзывания линейную скорость, равную скорости точек наружной поверхности приводного ролика.

Затем проволока через узел рихтовки поступает на промежуточный узел намотки, верхний ролик которого с помощью шарнирно установленного рычага с противовесом обеспечивает требуемое усилие натяжения при намотке. Узел укладчика предназначен для равномерного распределения проволоки с определенным шагом на приемной катушке узла намотки.

Как следует из анализа рассмотренной кинематики и результатов предшествующих исследований [1, 2], основными причинами, влияющими на точность мерного намота проволоки на цилиндрические катушки, являются:

- изменение натяжения проволоки в процессе намота;
- изменение диаметров проволоки и мерного ролика;
- расположение проволоки на цилиндрической обмотке.

Последняя причина не оказывает влияния на изменение длины наматываемой проволоки, а воздействует на условия ее последующего размота. Поэтому проанализируем влияние первых двух причин на точность мерного намота проволоки.

От катушки запитки до приемной катушки, на которую проволока наматывается, ее натяжение

неизбежно изменяется. Как правило, при намоте оно создается через свободно вращающийся ролик или ролики, охваченные наматываемой проволокой, с помощью грузов, установленных на шарнирно закрепленных рычагах. Число роликов бывает весьма велико (в нашем случае это два ролика, образующих устройство натяжения в виде полиспада).

Поскольку намотка проволоки осуществляется с большими скоростями (до 1200 м/мин), неизбежно проявляется влияние на динамику изменения натяжения факторов, связанных с технологическим процессом и его параметрами, техническим состоянием механизма намота, его узлов и деталей, качеством изготовления катушек и т. п.

К основным из этих факторов можно отнести следующие:

- величину шага укладки витков и точность регулировки момента переключения виткоукладчика в крайних положениях;
- скорость намота;
- величину биения поверхности конусов пинолей механизма намота;
- значение радиального и торцевого биения катушек;
- вибрацию в подшипниковых опорах узла намота;
- температуру проволоки, наматываемой на катушку, и температуру окружающей среды и т. п.

Вследствие влияния перечисленных выше факторов наматываемая проволока испытывает динамические переменные нагрузки, а сообщаемая ей сила натяжения колеблется около своей средней величины  $T_0$  по периодическому закону, близкому к синусоидальному с периодом цикла намотки (одного оборота катушки).

Исходя из этого, переменное натяжение  $T$  можно задать формулой

$$T = T_0 \pm T_1 \sin(i, \Theta); \quad (1)$$

где  $\pm T_1$  – амплитуда колебаний натяжения  $T$ ;  $i$  – дробное или целое число, величина которого определяется конкретными условиями намотки, например, если колебание натяжения обусловлено только эксцентриситетом катушки, то  $i = 1$ ;  $\Theta$  – угол поворота приемной катушки.

Согласно последней зависимости натяжение проволоки колеблется в пределах

$$T_0 - T_1 \leq T \leq T_0 + T_1.$$

Это колебание натяжения вызовет удлинение проволоки, которое можно найти, используя закон Гука:

$$\Delta L = \frac{TL}{ES}, \quad (2)$$

где  $T$  – натяжение проволоки;  $E$  – модуль упругости материала проволоки;  $S$  – площадь ее поперечного сечения ( $S = \frac{\pi d^2}{4}$ , где  $d$  – диаметр наматываемой проволоки).

С учетом этого удлинение проволоки определится по формуле

$$\Delta L = \frac{4TL}{\pi E d^2}. \quad (3)$$

Используя метод относительных погрешностей [3], можно вычислить коэффициент влияния первичных погрешностей на точность намота проволоки.

Находим натуральный логарифм выражения (3)

$$\ln \Delta L_{\Sigma} = \ln T + \ln L - \ln E - 2 \ln d$$

и его дифференциал, причем в правой части используем сумму абсолютных значений его членов

$$\frac{\Delta L_{\Sigma}}{L} = \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta E}{E} + 2 \frac{\Delta d}{d}. \quad (4)$$

Учитывая вероятностный характер проявления первичных погрешностей, относительную погрешность удлинения проволоки определяем квадратичным сложением членов полученного выражения

$$\frac{\Delta L_{\Sigma}}{L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta d}{d}\right)^2}. \quad (5)$$

С учетом исходных данных:

$$T = 4H; \quad \Delta T = 1H; \quad \Delta L = 400 \text{ м};$$

$$L = 58 \cdot 10^3 \text{ м}; \quad E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$$

$$\Delta E = 3000 \text{ МПа};$$

$$d = 0,3 \text{ мм}; \Delta d = 0,02 \text{ мм}$$

получаем  $\frac{\Delta L_{\Sigma}}{L} \approx 0,304$ .

Таким образом, коэффициент влияния колебания усилия натяжения на точность намота проволоки составляет 0,304.

Влияние допуска на диаметр проволоки на погрешность ее мерного намота можно оценить следующим образом.

Длина проволоки в процессе намота контролируется с помощью измерительной системы, состоящей из измерительного ролика с наружным диаметром  $127,14 \pm 0,01$  мм, индуктивного датчика, считывающего импульсы с измерительного ролика и программируемого контроллера, который пересчитывает импульсы с датчика в метры (10 импульсов, поступающих с датчика, соответствуют 1 м).

Принцип действия системы счета длины заключается в следующем. Через измерительный ролик по наружному диаметру  $D$  проходит проволока диаметром  $d$  (рис. 2).

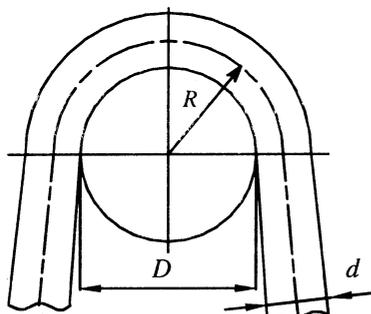


Рис. 2. Схема прохождения проволоки по измерительному ролику

Для устранения проскальзывания через измерительный ролик наматываются три витка. Внутри измерительного ролика находятся измерительные метки (4 шт.) и закреплен индуктивный датчик.

Длина проволоки, которая измеряется за один оборот измерительного ролика, может быть определена по формуле  $l = 2\pi R$ , где  $R$  – расстояние от центра вращения ролика до среднего слоя проволоки.

Диаметр измерительного ролика  $D = 127,14 \pm 0,01$  мм.

Диаметр проволоки  $d = 0,3 \pm 0,01$  мм.

Длина намота проволоки  $L = ln$ , где  $n$  – число оборотов мерного ролика,

$$L = 2\pi \left( \frac{D \pm \frac{IT_D}{2}}{2} + \frac{d \pm \frac{IT_d}{2}}{2} \right) = \pi n \left( D \pm \frac{IT_D}{2} + d \pm \frac{IT_d}{2} \right). \quad (6)$$

Погрешность намота может составить

$$\begin{aligned} \Delta L = L_{\max} - L_{\min} &= \pi n \left[ \left( D + \frac{IT_D}{2} + d + \frac{IT_d}{2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \left( D - \frac{IT_D}{2} + d - \frac{IT_d}{2} \right) \right] = \\ &= \pi n \left( D + \frac{IT_D}{2} + d + \frac{IT_d}{2} - D + \frac{IT_D}{2} - d + \frac{IT_d}{2} \right) = \\ &= \pi n (IT_D + IT_d). \end{aligned} \quad (7)$$

Число оборотов  $n$  равно

$$n = \frac{L}{l} = \frac{L}{2\pi \left( \frac{D+d}{2} \right)} = \frac{L}{\pi(D+d)}. \quad (8)$$

Тогда

$$\Delta L = \pi \frac{L}{\pi(D+d)} (IT_D + IT_d) = L \frac{IT_D + IT_d}{D+d}. \quad (9)$$

На величины  $D$  и  $d$  влияет также разность температур проволоки, измерительного ролика и окружающей среды. В начальный период работы намоточного станка эта разность будет наибольшей, затем температуры проволоки и измерительного ролика практически сравняются, но окажутся несколько выше температуры окружающей среды. Данное повышение температуры незначительно (в пределах  $\Delta t = 5 \dots 20$  °С), но оно вызовет изменение диаметров измерительного ролика и проволоки:

$$\Delta D_t = \alpha_D D \Delta t; \quad \Delta d_t = \alpha_d d \Delta t,$$

где  $\alpha_D$  и  $\alpha_d$  – коэффициенты температурного расширения материалов измерительного ролика и наматываемой проволоки.

Погрешность намота будет равна

$$\Delta L = L \frac{(IT_D + IT_d) + (\Delta D_t + \Delta d_t)}{D + d}. \quad (10)$$

Используя натуральный логарифм полученного выражения

$$\ln \Delta L = \ln L + \ln(IT_D + IT_d + \Delta D_t + \Delta d_t) - \ln(D + d), \quad (11)$$

находим его дифференциал, причем в правой части берем сумму абсолютных значений его членов

$$\frac{\Delta L_{\Sigma}}{L} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{IT_D + IT_d}{D + d} + \frac{\Delta D_t + \Delta d_t}{D + d}. \quad (12)$$

Учитывая вероятностный характер проявления первичных погрешностей, относительную погрешность удлинения проволоки определяем квадратическим сложением членов приведенного выражения

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{IT_D + IT_d}{D + d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D_t + \Delta d_t}{D + d}\right)^2}. \quad (13)$$

При  $L = 58 \cdot 10^3$  м;  $\Delta L = 400$  м;  $IT_D = IT_d = 0,02$  мм;  $\alpha_D = \alpha_d = 12 \cdot 10^{-6}$  1/°С;  $\Delta t = 10$  °С;  $D = 127,14$  мм;  $d = 0,3$  мм получим

$$\frac{\Delta L}{L} \approx 0,007.$$

Таким образом, коэффициент влияния изменения диаметров измерительного ролика и про-

волоки на погрешность намота равен 0,007, что является величиной второго порядка малости.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что наибольшее влияние на суммарную погрешность длины намота проволоки оказывает колебание усилия натяжения (коэффициент влияния – 0,304).

2. Влияние колебания диаметра проволоки и измерительного ролика в пределах допуска и в диапазоне рабочих температур на точность намота незначительно (коэффициент влияния – 0,007).

3. Для повышения точности намота проволоки необходимо в кинематику намоточного станка ввести дополнительное устройство, которое позволило бы с достаточной точностью компенсировать динамическую составляющую усилия натяжения проволоки.

4. С целью повышения точности намота проволоки устройство для измерения ее длины необходимо устанавливать на участке входа проволоки на приемную катушку, что позволит значительно снизить методическую погрешность, которая присутствует в существующих системах измерения, установленных на намоточных станках в настоящее время.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Парнес М. Г. Расчет и конструирование намоточных станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
2. Парнес М. Г. Изменение натяжения провода при прохождении через направляющий ролик // Электронная техника. – Сер. 7. № 3. – С. 11.
3. Коротков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теория точности измерительных устройств. – М.: Стандарт, 1988. – 346 с.

*Рецензент докт. техн. наук,  
проф. СОЛОМАХО В. Л.*