

ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

621.771.3

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ЗАКОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ НАМОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ

Канд. техн. наук, доц. А.А. РАДИОНОВ, д-р. техн. наук, проф. А.С. КАРАНДАЕВ

Рассмотрены особенности намотки металлической проволоки на шпули с позиции энергетического подхода, минимизации энергии, воспринимаемой шпулей от проволоки. При этом в качестве критерия оценки принят минимум величины деформации элементов самой шпули. В результате приведенных аналитических и экспериментальных исследований установлено, что при намотке металлической проволоки на шпули наиболее рациональным является закон изменения натяжения, при котором оно изменяется обратно пропорционально радиусу наковки. В этом случае электропривод намоточного аппарата должен реализовывать принцип регулирования, обеспечивающий постоянство электромагнитного момента на валу двигателя. Предложена инженерная методика определения величины начального натяжения проволоки (при ее намотке на пустой барабан шпули).

Одними из наиболее ответственных технологических звеньев процесса производства металлической проволоки являются намоточные аппараты, предназначенные для съема готовой продукции с прокатных либо волочильных станов. При многослойном наматывании проволоки на катушку натяжение не только стабилизирует технологический процесс, но и оказывает существенное влияние на качество продукции и на срок эксплуатации шпуль. Величина натяжения должна быть, с одной стороны, достаточной для того, чтобы исключить “рыхлый” намот, приводящий к запутыванию проволоки, и обеспечить заданный коэффициент заполнения, а с другой стороны, не должна приводить к обрыву наматываемой проволоки и необоснованному завышению количества потребляемой на эту операцию энергии.

Для обеспечения стабильного процесса прокатки (волочения) намоточный аппарат должен обеспечить заданное минимальное натяжение. Так, если для процесса прокатки эта величина жестко не регламентируется, то для волочения она должна быть достаточной для исключения проскальзывания проволоки по барабану. Это условие может быть определено зависимостью [1]

$$T_{\min} \geq T_{\text{чб}} e^{-\alpha f}, \quad (1)$$

где $T_{\text{чб}}$ - натяжение проволоки перед чистовым барабаном (усилие волочения);

α - угол охвата проволокой чистового барабана;

f - коэффициент трения между чистовым барабаном и проволокой.

С другой стороны, с целью исключения обрыва проволоки величина натяжения должна быть ограничена значением

$$T_{\max} \leq k_z \sigma_{\text{пл}} S_n, \quad (2)$$

где k_z - коэффициент запаса;

$\sigma_{\text{пл}}$ - предел пропорциональности проволоки;

S_n - сечение проволоки.

Следовательно, для обеспечения непрерывности процесса волочения величина натяжения проволоки, наматываемой на катушку, не должна выходить за границы диапазона

$$T_{\text{чб}} e^{-\alpha f} \leq T \leq k_z \sigma_{\text{пл}} S_n. \quad (3)$$

Особый интерес вызывает определение закона изменения натяжения в процессе намотки. Возможно применение трех принципиально различных законов:

$T_M = \text{const}$ - с неизменным в процессе намотки натяжением;

$T_M = f(1/R_M)$ - величина натяжения изменяется обратно пропорционально радиусу мотка, т.е. уменьшается с ростом радиуса паковки;

$T_M = f(R_M)$ - величина натяжения изменяется прямо пропорционально радиусу мотка и увеличивается с ростом радиуса паковки.

Первый закон может быть обеспечен при условии реализации принципа пропорциональности электромагнитной мощности приводного электродвигателя

$N_{эм}$ намоточного аппарата скорости намотки проволоки V_M (при неизменной скорости – принцип постоянства электромагнитной мощности)

$$T_M = \frac{N_{эм}}{V_M} \cdot \eta = \frac{M_{эм}}{R_M} \cdot j_{ред} \cdot \eta = \frac{I_я \cdot k \cdot \Phi}{R_M} \cdot j_{ред} \cdot \eta = \text{const}, \quad (4)$$

где η – к.п.д. привода с учетом потерь в редукторе;

$j_{ред}$ – передаточное число редуктора;

$M_{эм}$ – электромагнитный момент двигателя намоточного аппарата;

$I_я$, Φ , k – ток якоря, поток, конструктивная постоянная двигателя постоянного тока.

Второй закон может быть весьма просто реализован применением для намоточного аппарата электропривода, построенного по системе источник тока – двигатель и реализующего принцип постоянства электромагнитного момента на валу двигателя

$$M_{эм} = T_M R_M \eta = \text{const}. \quad (5)$$

Третий закон получил наибольшее распространение на практике в намоточных аппаратах с электромагнитными муфтами скольжения.

Для определения рационального закона изменения натяжения проволоки целесообразно воспользоваться энергетическим подходом, суть которого состоит в минимизации энергии, воспринимаемой шпулей от проволоки. При этом в качестве критерия оценки следует принять минимум величины деформации элементов самой шпули.

При нагружениях шпуль, происходящих в процессе намотки проволоки, элементы шпули должны деформироваться исключительно упруго. В противном случае шпуля после размотки останется в деформируемом состоянии или, как показывает практика, даже с частично оторванными фланцами, и будет непригодна для дальнейшей эксплуатации. Комплексные экспериментальные исследования процесса взаимодействия проволоки и шпули показали, что существенное влияние на деформацию шпуль оказывают уровень натяжения проволоки, закон его изменения в процессе намотки, шаг раскладки проволоки и ширина хода укладчика. На коэффициент заполнения мотков весомое воздействие оказывает лишь работа укладчика. Причем влияние работы укладчика на коэффициент заполнения прямо пропорционально его влиянию на деформацию фланцев: увеличение шага намотки или уменьшение ширины хода укладчика ведет как к сни-

жению деформации шпули, так и к одновременному снижению коэффициента заполнения паковки. На рис. 1 приведены экспериментально полученные зависимости максимального прогиба фланцев ΔH_{max} , барабана шпули ΔD_B , коэффициента заполнения

$$k_{зап} = \frac{S_n n_{пак}}{S_{пак}} = \frac{S_n n_{пак}}{b \cdot (R_{конм} - R_{ом})} \quad (6)$$

от натяжения намотки T_M , шага намотки λ_M и ширины хода укладчика

$$\Delta b_{укл} = \frac{b - b_{укл}}{2}, \quad (7)$$

где $S_{пак}$ - площадь сечения паковки;

$n_{пак}$ - число витков проволоки в паковке.

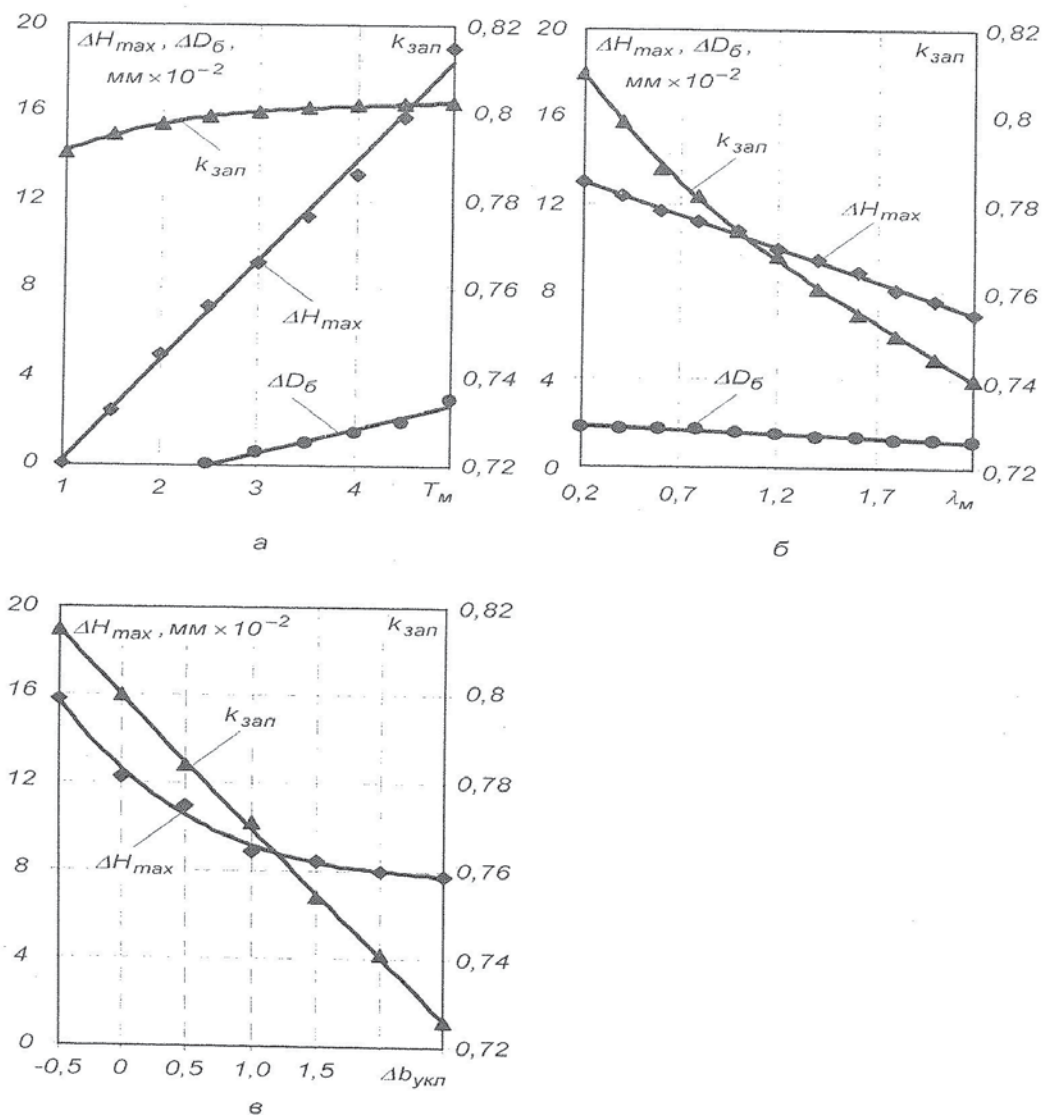


Рис. 1 Зависимости максимального прогиба фланцев, барабана шпули и коэффициента заполнения от натяжения намотки (а), шага намотки (б) и ширины хода укладчика (в)

Изменение натяжения в процессе намотки оказывает существенное влияние на деформацию шпуль и практически никак не сказывается на коэффициенте заполнения паковки. А потому именно применение оптимального закона изменения натяжения позволит производить намотку с минимальными затратами энергии, достаточным заполнением паковки и исключением пластической деформации шпуль.

Проволока, наматываемая на шпулю, может запасать как тепловую энергию, приобретенную в процессе пластических деформаций, так и потенциальную энергию упругих и пластических деформаций. Характер деформации: упругий, либо пластический, зависит от напряжений, возникающих в проволоке при ее намотке на барабан. Максимальные деформация $\varepsilon_{изг}$ и напряжения $\sigma_{изг}$, возникающие в проволоке диаметром $2 \cdot R_{п}$, могут быть найдены по зависимостям [2]

$$\varepsilon_{изг} = \frac{2 \cdot R_{п}}{2 \cdot R_{м} + 2 \cdot R_{п}} \approx \frac{R_{п}}{R_{м}}; \quad \sigma_{изг} = \varepsilon_{изг} \cdot E_{п}. \quad (8)$$

где $E_{п}$ - модуль упругости (Юнга) материала проволоки.

На рис. 2 в качестве примера показаны зависимости изменения напряжений, возникающих в проволоке из стали марки Ст. 3 при ее намотке. Зависимость построена в функции двух координат – диаметра наматываемой проволоки и радиуса намота от начального (радиуса барабана шпули) 0,12 м до максимально возможного 0,29 м.

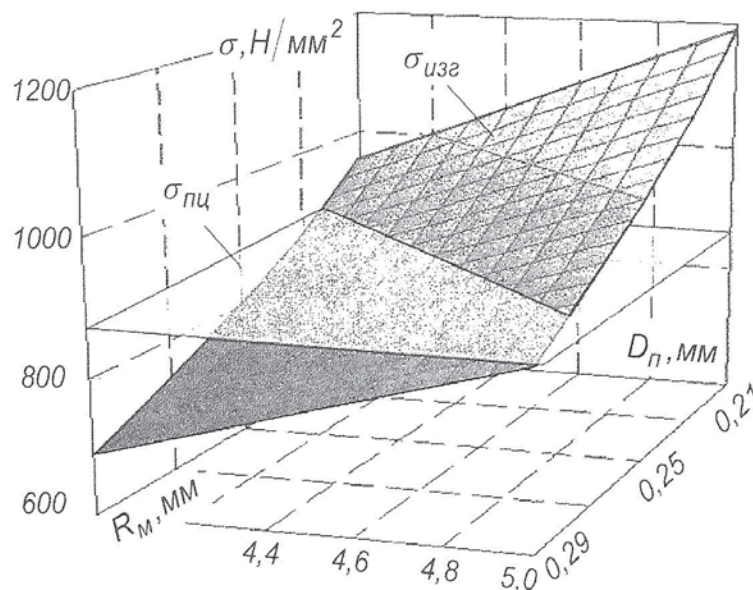


Рис. 2. Напряжения, возникающие в проволоке при ее намотке на барабан шпули

Сравнение двух поверхностей показывает, что при намотке с минимальным радиусом изгиба проволока деформируется упруго-пластически и только при определенных условиях для малых диаметров и больших радиусов намота она может рассматриваться как абсолютно упругая система.

Выражение для определения полной энергии, запасаемой проволокой,

$$W_{II} = W_{ур} + W_{изг} + W_{круч} + W_t, \quad (9)$$

где $W_{ур}$, $W_{круч}$, $W_{изг}$ - потенциальные энергии упругого растяжения, кручения и упруго-пластического изгиба, соответственно;

W_t - тепловая энергия пластических деформаций.

В свою очередь распределение этой энергии в системе "паковка-шпуля-окружающая среда" описывается выражением

$$W_{II} = W_{пак} + W_{ш} + W_{о.с.}, \quad (10)$$

где $W_{пак}$ - энергия, запасенная проволокой в паковке;

$W_{ш}$ - энергия, воспринятая шпулей;

$W_{о.с.}$ - часть тепловой энергии, перешедшая в окружающую среду.

В общем случае деформация элементов шпули происходит как в упругой, так и в пластической области, поэтому

$$W_{ш} = W_{уд_{\sigma}} + W_{пл_{\sigma}} + W_{уд_{\phi}} + W_{пл_{\phi}} + W_{t_{ш}}, \quad (11)$$

где $W_{уд_{\sigma}}$, $W_{пл_{\sigma}}$, $W_{уд_{\phi}}$, $W_{пл_{\phi}}$ - части запасенной в проволоке энергии,

соответствующие упругой и пластической деформации барабанов и фланцев шпули;

$W_{t_{ш}}$ - часть тепловой энергии, перешедшей от проволоки к шпуле.

Скручивание проволоки может возникать только на волочильных станах магазинного типа и на современных прямоточных волочильных станах и практически отсутствует на прокатных станах. Энергия упругой деформации изгиба, запасаемая проволокой, шпуле не передается, поскольку эту энергию проволока способна отдать только в случае увеличения радиуса своих витков. Энергия, затраченная на пластический изгиб, также остается в паковке и не может быть передана элементам шпули. В нормальном режиме работы при достаточном охлаждении проволоки те-

пловой энергией $W_{\text{ш}}$ можно пренебречь. Учитывая изложенное, для системы “паковка-шпуля” согласно (9), (10) справедливо приближенное равенство

$$W_{\text{ш}} \approx W_{\text{ур}} - W_{\text{урпак}}, \quad (12)$$

где $W_{\text{урпак}}$ - часть энергии упругого растяжения, оставшаяся в паковке.

Следовательно, уменьшить энергию, воспринимаемую шпулей от проволоки можно не только снижением уровня натяжения, но и увеличением доли потенциальной энергии упругого растяжения, остающейся в паковке.

Энергия упругой деформации растяжения, запасаемая проволокой при намотке может быть определена по формуле

$$W_{\text{ур}} = \frac{1}{2E_{\text{п}}S_{\text{п}}} \int_0^{L_{\text{п}}} T_{\text{м}}^2(l) dl, \quad (13)$$

где $L_{\text{п}}$ - длина намотанной проволоки.

Величину энергии упругого изгиба $W_{\text{изг}}$ можно определить из следующих рассуждений. В общем случае выражение для расчета:

$$W_{\text{изг}} = \frac{1}{2} \int_0^{\varphi_{\text{пак}}} M_{\text{изг}}(\phi) d\phi, \quad (14)$$

где $\varphi_{\text{пак}}$ - угол поворота паковки.

Момент, необходимый для изгиба проволоки

$$M_{\text{изг}} = F_{\text{изг}} \cdot R_{\text{м}}, \quad \phi = \frac{L_{\text{п}}}{R_{\text{м}}}, \quad (15)$$

где $F_{\text{изг}}$ - минимально необходимая сила для упругого изгиба по заданному радиусу,

$$F_{\text{изг}} = \frac{\sigma_{\text{изг}} J_{\text{уи}}}{R_{\text{м}}}, \quad (16)$$

при упруго-пластическом изгибе

$$F_{\text{изг}} = \frac{\sigma J_{\text{уип}}}{R_{\text{м}}}, \quad (17)$$

$J_{\text{уи}}$, $J_{\text{уип}}$ - осевые моменты сопротивления проволоки при упругом и пластическом изгибах [2]

$$J_{\text{уи}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{п}}^3}{32}, \quad J_{\text{уип}} = \frac{D_{\text{п}}^3}{6}. \quad (18)$$

Подставив (15)-(18) в (14), после несложных преобразований получим

$$W_{\text{изг}} = \frac{E_n J_{\text{уп}}(y_{\text{ни}}) b_M}{D_n} \left[\ln \left(\frac{R_M}{R_{\sigma_M}} \right) - \frac{R_{\sigma_M}^2}{2R_M^2} + \frac{1}{2} \right].$$

На рис. 3 приведены кривые изменения соотношения энергии упругого растяжения к энергии упругого изгиба.

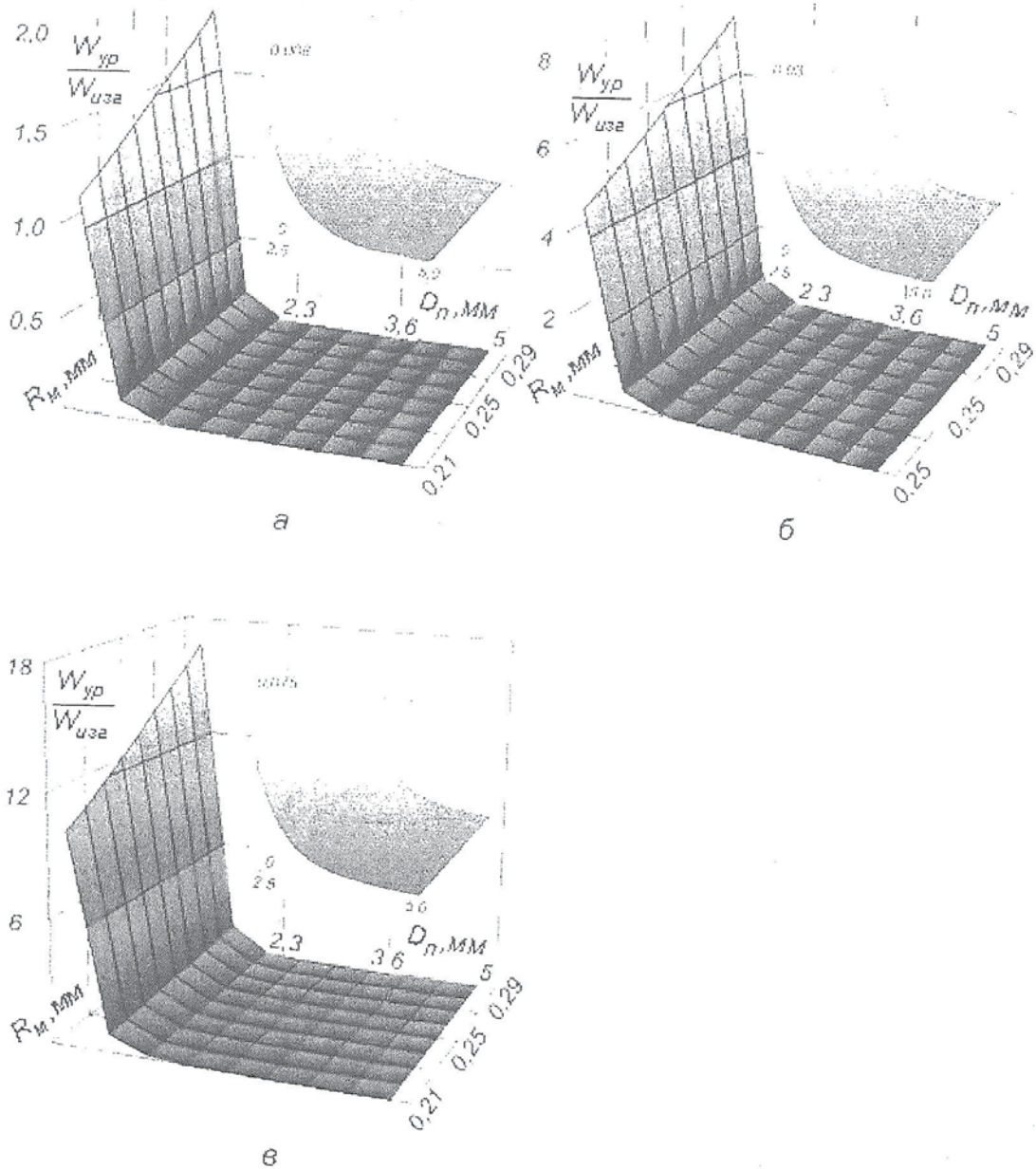


Рис.3 Расчетные кривые изменения соотношения энергии упругого растяжения к энергии упругого изгиба при натяжении намотки 200 Н (а), 400 Н (б) и 600 Н (в)

Анализ величин $W_{ур}$ и $W_{изг}$ показывает, что для проволоки диаметром менее 2,0...2,5 мм основную часть всей запасаемой в ней энергии составляет потенциальная энергия упругого растяжения. С увеличением диаметра проволоки энергия $W_{ур}$ уменьшается, а потенциальная энергия упругого изгиба резко возрастает.

Приведенные результаты расчетов согласуются с опытом эксплуатации шпуль на волочильных станах: деформация шпуль, применяемых для намотки тонкой проволоки, значительно больше деформаций шпуль, на которые наматывается более толстая проволока. С позиции энергетического подхода к взаимодействию проволоки и шпули это объясняется большой разницей в величинах $W_{ур}$. Например, в паковке, полученной на шпуле намоткой проволоки диаметром 1,0 мм с натяжением 200 Н, эта энергия практически в 200 раз больше, чем в паковке, полученной на той же шпуле намоткой проволоки диаметром 4,7 мм с натяжением 600 Н.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований максимального прогиба фланцев шпули от величины потенциальной энергии упругого растяжения проволоки для перечисленных выше трех законов изменения натяжения. Экспериментальные исследования проведены на специально созданной в условиях Магнитогорского государственного технического университета лабораторной установке.

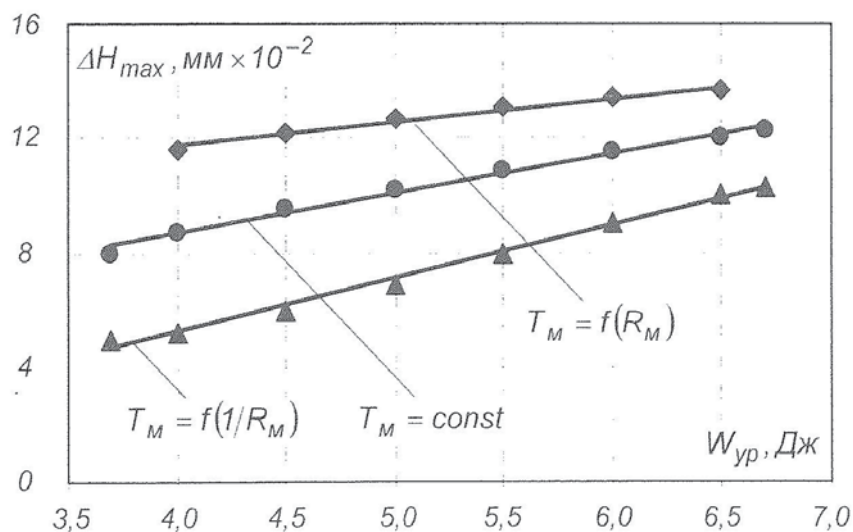


Рис. 4. Зависимости максимального суммарного прогиба фланцев шпули от потенциальной энергии растяжения проволоки для намоток с разными законами изменения натяжения

Для того чтобы с позиций энергетического подхода можно было сравнивать прогибы фланцев, полученные в результате намоток с разными законами изменения натяжения, потенциальная энергия упругой деформации растяжения проволоки в сравниваемых процессах должна быть одинаковой. Расчет величины этой энергии был выполнен по зависимости (13).

По сравнению с законом $T_M = \text{const}$ применение закона уменьшения натяжения $T_M = f(1/R_M)$ в диапазоне энергии 4...6,5 Дж снижает прогиб фланцев на 40...17%. По сравнению с законом увеличения натяжения $T_M = f(R_M)$, применение этого закона в том же диапазоне изменения потенциальной энергии растяжения уменьшает прогиб фланцев на 54...23%. Прогибы барабана шпули в анализируемом диапазоне энергии $W_{ур}$ для всех трех законов были практически одинаковыми. На рис. 5 представлены зависимости энергии упругого растяжения проволоки в разрезе толщины паковки для исследуемых законов изменения натяжения намотки, полученные расчетным путем.

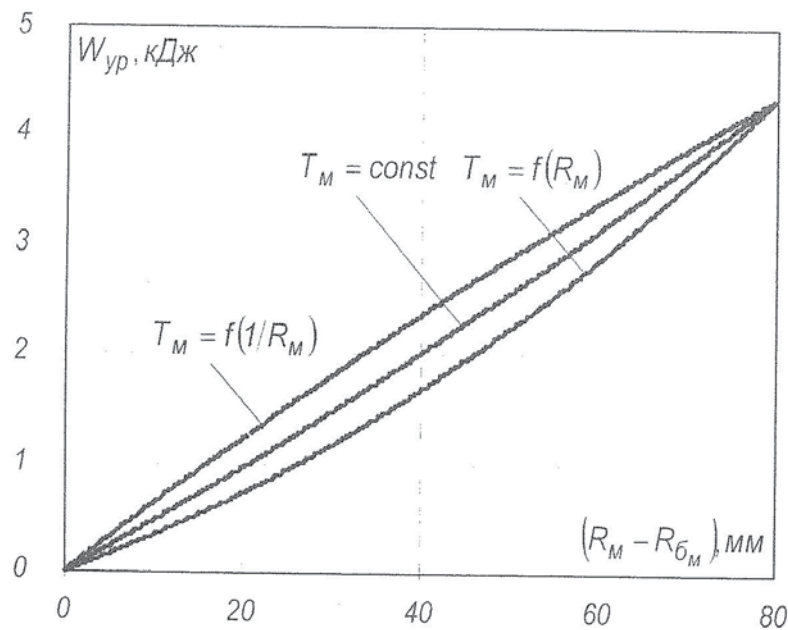


Рис. 5. Изменение потенциальной энергии растяжения проволоки в функции радиуса намота (толщины паковки) для различных законов изменения натяжения

Из рисунка следует, что характер изменения натяжения в процессе намотки существенно влияет на распределение энергии W_{yp} по толщине паковки. Так, при ее толщине, соответствующей половине всей длины проволоки, энергия при реализации закона $T_m = f(1/R_m)$, на 60% больше энергии, затрачиваемой при намотке по закону $T_m = f(R_m)$. При толщине паковки, соответствующей 80% всей длины проволоки эта разница составляет около 20%.

Совместный анализ графиков, представленных на рис. 4 и рис. 5, показывает, что повышение концентрации энергии W_{yp} вблизи барабана шпули уменьшает деформацию фланцев. Этому явлению можно найти простое объяснение. Изгибающий момент, действующий на фланец в любой точке, пропорционален давлению на него в этой точке и плечу – расстоянию от барабана до данной точки фланца. Распределение энергии в паковке определяет изменение давления на фланцы в функции толщины паковки. Если концентрация энергии W_{yp} по толщине паковки уменьшается, то соответственно снижается и давление на фланцы, благодаря чему уменьшаются действующие на них суммарные изгибающие моменты.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наиболее рациональным в отношении снижения деформаций фланцев является закон, при котором оно изменяется обратно пропорционально радиусу паковки

$$T_m = T_{m_{нач}} \frac{R_{\sigma_m}}{R_m(L_{II})}. \quad (20)$$

В случае применения этого закона необходима методика определения величины начального натяжения $T_{m_{нач}}$, формируемого электроприводом при намотке проволоки на пустой барабан шпули. Эта величина может быть получена на основе обобщения ла-

бораторных исследований и применения рассмотренного энергетического подхода к процессу намотки проволоки.

Результаты экспериментов по исследованию деформации шпуль, проведенных на лабораторной установке, могут быть распространены на промышленные шпули и процессы намотки. Для этого полученные результаты были обобщены с применением анализа размерностей [3]. Основанием для обобщения послужило геометрическое подобие реальных шпуль и их моделей, реальной проволоки и ее модели и условие физического подобия (свойства материалов моделей близки к свойствам материала промышленных шпуль и проволоки).

Для проволоки постоянной длины и диаметра закон изменения натяжения в процессе намотки определяет величину запасаемой потенциальной энергии упругого растяжения. Как показали исследования, при неизменном шаге раскладки и постоянной ширине хода укладчика прогиб фланцев зависит лишь от двух наиболее существенных факторов – величины натяжения и энергии упругого растяжения проволоки:

$$\Delta H_{\max} = f(T_{\text{нач}}; W_{\text{уп}}). \quad (21)$$

Зависимость (21) не полностью отражает механизм деформации фланцев, что естественно сказывается на результатах обобщения, однако учет всего двух факторов, определяющее влияние которых доказано экспериментально, значительно упрощает задачу.

Определительное уравнение для (21) имеет вид [3]

$$\Delta H_{\max} = A \cdot (T_{\text{нач}})^c \cdot (W_{\text{уп}})^d, \quad (22)$$

где A , c , d – показатели размерности.

Представив размерности входящих в (22) величин через символ силы T и символ длины L , получим

$$L = T^c \cdot (T \cdot L)^d. \quad (23)$$

Из (23) следует, что $c = -1$, $d = 1$. С учетом этого зависимость (21) принимает вид

$$\Delta H_{\max} = A \cdot \frac{W_{\text{ур}}}{T_{\text{Мнач}}}. \quad (24)$$

Из (24) выразим безразмерный комплекс – критерий подобия

$$A = \frac{\Delta H_{\max} \cdot T_{\text{Мнач}}}{W_{\text{ур}}}, \quad (25)$$

среднее значения которого определено по данным экспериментов на лабораторной установке и в промышленных условиях на уровне $2,9 \cdot 10^{-5}$. Полученный безразмерный комплекс позволяет связать деформацию фланцев шпули со свойствами наматываемой проволоки и параметрами электропривода.

Для закона изменения натяжения катушки (20) выражение (13) преобразовано к виду

$$W_{\text{ур}} = \frac{4T_{\text{Мнач}}^2 R_{\sigma_M}^2 b_M}{E_n S_n D_n^2} \ln \left(\frac{R_{\text{Мmax}}}{R_{\sigma_M}} \right). \quad (26)$$

Откуда максимальное значение начального натяжения для конкретного случая катушки может быть определено при совместном рассмотрении зависимостей (25) и (26) из выражения

$$T_{\text{Мнач}} \leq \frac{\Delta H_{\max_{\text{ср}}} \cdot E_n S_n D_n^2}{A_{\text{ср}} \cdot R_{\sigma_M}^2 b_M \ln \left(\frac{R_{\text{М}}}{R_{\sigma_M}} \right)}, \quad (27)$$

где $\Delta H_{\max_{\text{ср}}} \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$ м - средняя величина максимального упругого изгиба

обоих фланцев для шпуль рассматриваемого типоразмера;

$A_{\text{ср}}$ - средняя величина безразмерного комплекса в системе СИ.

Мгновенное значение натяжения T_i в любой момент намотки также будет ограничиваться минимально допустимым соотношением K между ним и величиной силы $F_{\text{изг}}$, необходимой для изгиба проволоки по текущему радиусу

$$\frac{T_M}{F_{\text{изг}}} \geq K. \quad (28)$$

Коэффициент K определен исходя из опыта эксплуатации намоточных аппаратов исходя из условия стабильности процесса намотки на уровне $K = 1,5 \dots 1,8$ [1]. Тогда, подставляя (16)–(18) в (28), получим

$$T_M \geq 0,3 \cdot \frac{\sigma \cdot D_{\text{п}}^3}{R_M} \quad (29)$$

или с учетом (20)

$$T_{\text{нач}} \geq 0,3 \frac{\sigma D_{\text{п}}^3}{R_{\text{бМ}}} \quad (30)$$

На рис. 6 приведена область допустимых значений величин начального натяжения намотки проволоки на барабан диаметром $0,42 \text{ м}$ в зависимости от ее диаметра, ограниченная кривыми, определяющими рассмотренные выше условия.

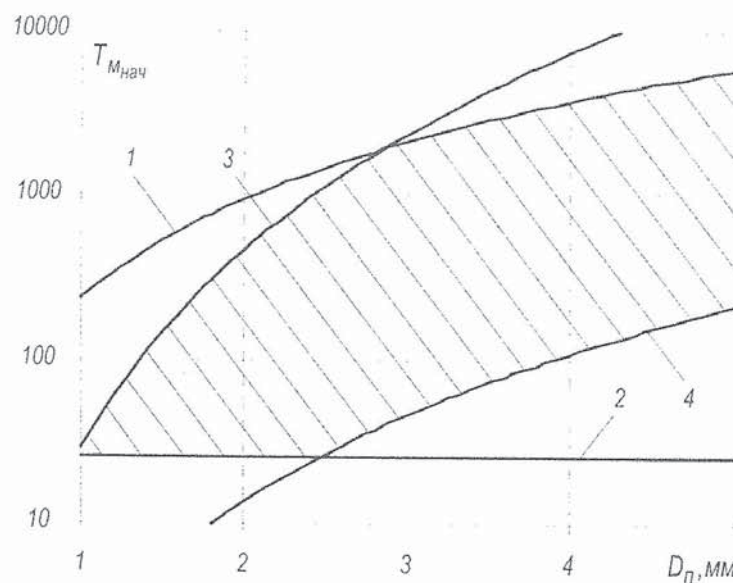


Рис. 6. Область допустимых величин начального натяжения проволоки в зависимости от ее диаметра для шпуль с диаметром барабана $0,42 \text{ м}$

Кривые 1 и 2 заданы условием (3) и исключают утяжку (обрыв) проволоки и ее проскальзывание по чистовому барабану. Кривая 3 определена условием (27) и задает максимально возможную деформацию шпули. Кривая 4 определяет границу стабильности процесса намотки и рассчитана по условию (30).

При конкретном выборе начального натяжения из области допустимых значений следует останавливаться на минимальных величинах, поскольку завышение натяжения намотки приведет к необоснованному увеличению энергоемкости процесса при неизменных параметрах его качества.

Также следует отметить, что величины начальных натяжений определены без учета радиальных биений барабана, что соответствует новым шпулям. Эксплуатируемые же шпули могут иметь радиальные биения, а также эксцентриситет барабана до 5...10 мм, обусловленный его пластической деформацией. Учитывая это необходимо предусмотреть возможность повышения уровня начального натяжения на 15...25 % (степень завышения начальных натяжений была определена экспериментальным путем на основе анализа работы электроприводов намоточных аппаратов с электромагнитными муфтами скольжения).

Таким образом, в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что:

- при намотке металлической проволоки на шпули наиболее рациональным является закон изменения натяжения обратно пропорционально радиусу паковки;
- предложена инженерная методика определения величины начального натяжения проволоки (при ее намотке на пустой барабан шпули);
- электропривод намоточного аппарата должен реализовывать принцип регулирования, обеспечивающий постоянство электромагнитного момента на валу двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станков для производства стальной проволоки: Монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 311 с.
2. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. – М.: Физматгиз, 1960, – 380 с.
3. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1998, – 704 с.