

УДК 629.7.036:62-762.8:621.778.2

Кондратюк Э.В., Зиличихис С.Д., Гребенников М.А., Емельянова Л.Л.

Государственное предприятие «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко. Украина, г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТЕЛА НАМОТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ГТД

Исследованы процессы наматывания нитей и выполнен анализ отличительных особенностей физико-механических свойств тел намотки. Подробно изучено влияние различных факторов на напряженное состояние тела намотки при изготовлении щеточных уплотнений ГТД. Как результат, представлены расчеты и установлены зависимости натяжения проволоки и давления, оказываемого на оправку в процессе наматывания с учетом изгибной жесткости нити. Определены оптимальные конструкторско-технологические параметры тела намотки.

Ключевые слова: щеточное уплотнение; проволока; нить; натяжение; намотка; оправка, напряжение.

Введение

Интенсивное развитие авиационной промышленности ставит задачи по повышению КПД газотурбинных двигателей и соответственно определяет необходимость создания новых высокоэффективных изделий, а также разработки перспективных технологических процессов и высокопроизводительных средств получения данных изделий, удовлетворяющих повышенным требованиям.

В двигателестроении одним из путей повышения коэффициента полезного действия является применение различных типов уплотнений в системе охлаждения и суфлирования с целью сведения паразитных утечек к минимуму в полостях компрессора и турбины. Сегодня прикладываются значительные усилия по внедрению более эффективных уплотнений, одними из которых являются щеточные уплотнения (рис. 1).

Неотъемлемой технологической операцией процесса изготовления щеточных уплотнений (ЩУ) является операция наматывания (рис. 2).

Процессы наматывания нитей, проволоки, лент и других ните- и лентоподобных материалов широко используют в самых различных областях техники.

В большинстве случаев в процессе наматывания необходимо обеспечить заданные параметры тела намотки: его форму, структуру укладки нити, определенный уровень внутренних напряжений, устойчивость формы оправки при выполнении дальнейших технологических операций. В процессе создания специальных намоточных механизмов решают как машиностроительные задачи, так и задачи механики гибкой нити.

Для изготовления уплотнительного элемента щеточного уплотнения ГТД на предприятии ГП «Ивченко-Прогресс» был проведен ряд экспериментов по выбору материала проволоки.

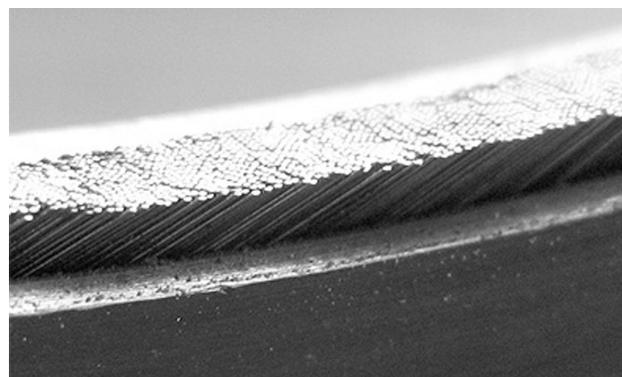


Рис. 1. Фотографии щеточного уплотнения

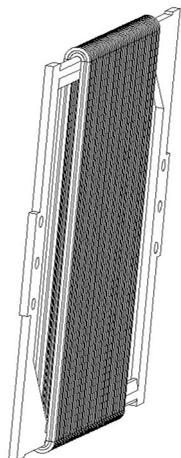


Рис. 2. Процесс наматывания проволоки на оправку

Проведенные эксперименты показали существенное преимущество микропроволоки из импортного сплава на кобальтовой основе диаметром $\Phi 0,07$ мм в сравнении с другими возможными материалами, в процессе нагревов до рабочих температур, как по прочностным характеристикам, так и по стойкости к окислению. Данная проволока отвечает конструктивным и технологическим требованиям [1, 2].

Формирование плотно прилегающих проволочек и угол установки в паковку достигали преимущественно методом намотки на оправку квадратного или прямоугольного сечения (рис. 2).

При выполнении данной операции используется рядовая структура укладки нити, так как шаг намотки равен ширине нити, то есть диаметру проволоки.

Процесс наматывания реализуется последовательным оборачиванием оправки витками натянутой нити и сопровождается их послойной раскладкой по заданной схеме. При этом вращательное движение может совершать оправка или нитеводитель, либо и оправка, и нитеводитель одновременно. Операцию раскладки выполняет механизм раскладки, который осуществляет возвратно-поступательное движение нитеводителя. К основным пара-

метрам процесса наматывания относят намоточное натяжение нити, скорость намотки, характер перемещения нитеводителя.

Постановка задачи

Широкое использование метода намотки в технике, многообразии требований, предъявляемых к свойствам намоточных изделий, определили необходимость всестороннего и тщательного исследования комплекса научно-технических проблем, связанных с процессом наматывания [3].

В настоящее время теория намотки довольно развита, и имеет несколько направлений, из которых можно выделить следующие:

- исследование процесса формообразования намоточных изделий при различных законах раскладки нити (рис. 3);
- исследование напряженного состояния, физико-механических свойств намоточных изделий и оптимизация их параметров;
- разработка методов проектирования приемно-намоточных механизмов для формирования изделий с заданными свойствами.

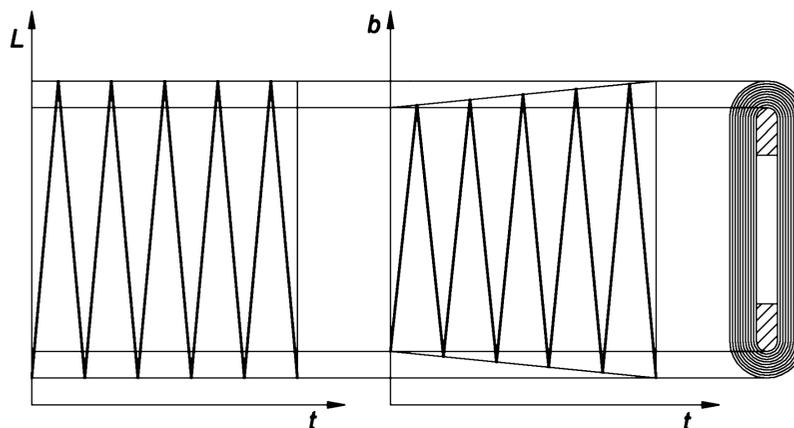


Рис. 3. Закон раскладки нити: а) по длине намотки; б) по толщине намотки

Хотя каждое из этих направлений имеет свои характерные особенности и может изучаться автономно, но между ними существует глубокая взаимосвязь.

Отличительные особенности физико-механических свойств тел намотки.

Тело намотки (в данном случае – проволочный пакет) представляет собой неоднородную среду, состоящую из дисперсных, ограниченно связанных между собой элементов – волокон, разделенных воздушными прослойками. По физико-механическим характеристикам, упругим и деформационным свойствам тела намотки существенно отличаются от однородных сплошных сред.

Свойства тела намотки обусловлены большим числом факторов (параметров), различающихся по своей природе. Существуют следующие группы параметров:

- 1) геометрические – форма площади поперечного сечения нити, угол намотки, начальный и конечный радиусы намотки (толщина намотки);
- 2) кинематические – линейная скорость намотки, средняя скорость раскладки нити;
- 3) физические – упругие свойства волокон, податливость оправки, состояние окружающей среды (температура, влажность);
- 4) силовые – намоточное натяжение нити, усилие прижима фрикциона.

Отдельные параметры должны учитывать временные особенности: прочностные характеристики нити, факторы старения и др.

Естественно, что изучение свойств среды в зависимости от столь большого числа факторов представляет значительные трудности. В связи с этим целесообразно ввести в рассмотрение некоторые обобщенные факторы, определяющие основные свойства тела намотки и синтезирующие перечисленные абсолютные параметры.

Известно, что для многих сплошных однородных сред упругие и деформационные свойства мало зависят от того, находится ли среда в естественном или напряженном состоянии. О системах, образованных методом намотки, этого сказать нельзя. Простейшие эксперименты с телами намотки свидетельствуют о том, что с повышением уровня напряженного состояния (межслойных давлений) увеличивается плотность и упругость среды. Поскольку внутреннее давление p зависит от большей части перечисленных абсолютных параметров системы, то его следует принять за один из обобщенных факторов при анализе физико-механических свойств тел намотки.

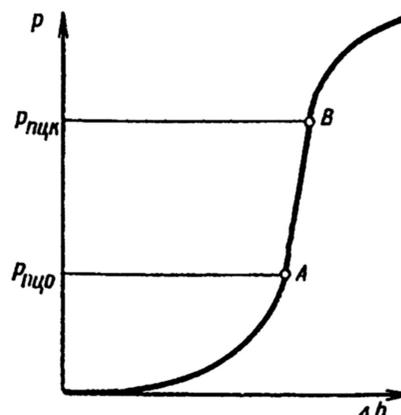
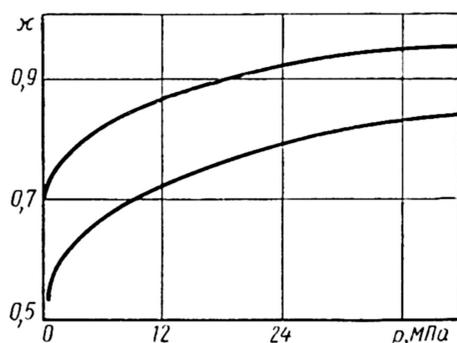
Отличительная особенность тел намотки – значительная пористость. Наличие пор определяет свойство сжимаемости, которое проявляется в способности среды изменять внутреннее строение (взаимное расположение волокон) и геометрические размеры. Физико-механические свойства тела намотки существенно зависят от доли объема, занимаемого порами в общем объеме. Введем в рассмотрение коэффициента заполнения нитью объема тела намотки:

$$\chi = V_0/V_n,$$

где V_0 и V_n – объем соответственно нити и тела намотки.

Несмотря на большое различие в природе и свойствах волокон, характер изменения зависимости $\chi(p)$ при увеличении давления примерно одинаков, а абсолютные значения объемов при одних и тех же давлениях отличаются незначительно.

Анализ экспериментальных данных позволяет ввести в рассмотрение обобщенный график $\chi(p)$ (рис. 4). Ширина полосы при любом p определяет разброс значений χ , обусловленный видом намоточного материала, структурой укладки нити, формой и размерами ее поперечного сечения [3].



Расчеты и результаты исследований

Рис. 4. а) обобщенный график зависимости параметра χ от давления;
б) диаграмма сжатия ограниченно-связанного пористого материала

Существуют следующие факторы, оказывающие влияние на напряженное состояние тела намотки:

- 1) податливость оправки;
- 2) критический радиус намотки;
- 3) изгибная жесткость нити;
- 4) реологические особенности нити;
- 5) усилие прижима фрикционного цилиндра;
- 6) колебания натяжения нити при намотке от движения нитераскладчика.

Рассмотрим влияние каждого фактора отдельно:

1) Податливость оправки

Податливость оправки следует относить к числу важнейших факторов, определяющих уровень напряженного состояния тела намотки. С увеличением податливости оправки давление на нее со стороны тела намотки падает. Незнание или недооценка этого фактора при проектировании приемно-намоточных механизмов не позволяет выявить оптимальную конструкцию.

На предприятии по результатам ряда выполненных операций намотки отмечено, что происходит деформация (изгиб, кручение) оправки (рис. 5).

При наличии необратимых (пластических) деформаций в оправке, обусловленных высоким давлением на неё, оправка укреплялась утолщением её стенки и добавлением ребер жесткости. Это, естественно приводит к утяжелению конструкции, перерасходу материала. При этом повышается прочность оправки, но полностью не устраняется отрицательное явление. Данный эффект подтверждён теоретически, что видно из модели деформации оправки, ее двух вариантов конструкции с применением действующих нагрузок (рис. 5) и ниже приведенного расчета (п. 3).

Увеличение жесткости оправки обуславливает рост уровня напряженного состояния тела намотки и, следовательно, ухудшение прочностных свойств нитей, поскольку в местах их взаимного перекрещивания увеличиваются контактные пластические деформации.

Рациональным решением устранения этого эффекта можно считать использование слоистой оправки, у которой нижний слой, являющийся основанием, выполнен из жесткого однородного материала (металла), а верхний слой – из податливого материала, обладающего в широком диапазоне деформаций упруговосстанавливающими свойствами. Таким материалом могут быть, например, некоторые сорта резины, которые подчиняются закону Гука до деформации, достигающей 30%, а также полиуретан.

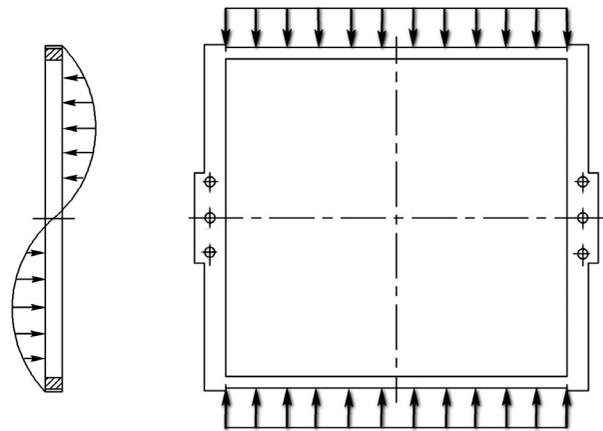
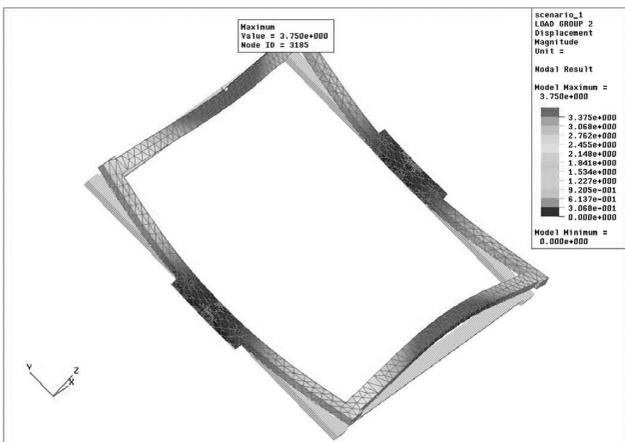
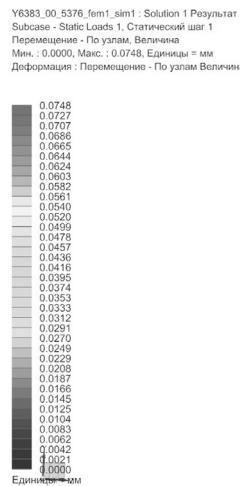


Рис. 5. Схема нагружения оправки



а)



б)

Рис. 5. Модель деформации оправки при толщине: а) 2 мм; б) 4 мм

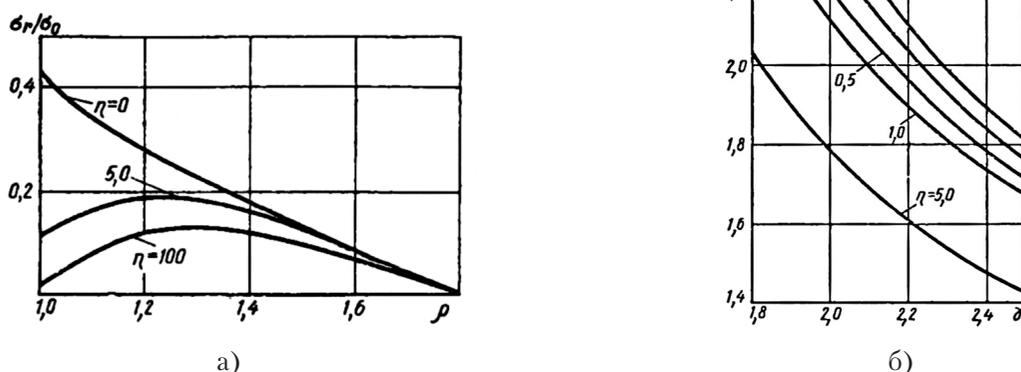


Рис. 6. а) график распределения напряжений в теле намотки при различной податливости оправки; б) зависимость критического радиуса намотки $\rho_{кр}$ от параметров γ , η

Представляет практический интерес решение вопроса о том, как глубоко по радиусу намотки может трансформироваться напряженное состояние при изменении податливости оправки. На графике (рис. 6, а) показан характер распределения межслойных давлений по радиусу тела намотки для трех значений критериального параметра:

- 1) случай абсолютно жесткой оправки $\eta = 0$;
- 2) случай податливой оправки с жестким основанием и верхним слоем, обладающим упруговосстанавливающими свойствами, $\eta = 5$;
- 3) случай абсолютно податливой оправки $\eta = 100$.

Из графика (рис. 6, а) можно сделать вывод, что характер и величина распределения межслойных давлений на используемые рамки для изготовления ЩУ соответствует случаю абсолютно жесткой оправки $\eta = 0$.

При использовании жестких оправок максимум давлений приходится на оправку. У намоточных изделий с податливой оправкой максимум давлений значительно смещен вглубь, причем тем дальше, чем выше ее податливость.

2) Критический радиус намотки

Экспериментально установлено, что с ростом толщины намотки давление на оправку увеличивается лишь до определенного момента. В дальнейшем, в зависимости от значений критериальных параметров, оно может сохраняться на практически неизменном уровне либо несколько падать. Значение такого параметра, при котором прекращается рост давления на оправку в процессе намотки, принято называть критическим $\rho_{кр}$.

Умение быстро оценить значение критического радиуса при проектировании намоточной системы важно с точки зрения выбора оптимальных параметров конструкции.

На сегодняшний день в работе по изготовлению щеточных уплотнений критический радиус намот-

ки составляет 3,2...5,8 мм, что вызывает деформации (изгиб, кручение) оправки и соответственно усложняет выполнение текущей операции и последующей электроэрозионной разрезки проволочного пакета.

Анализ приведенных кривых (рис. 6б) позволяет сделать некоторые практические выводы. Из графика (рис. 6, б) видно, что при $\eta = 5$ критический радиус намотки значительно уменьшается. Для снижения жесткости тела намотки необходимо уменьшать намоточное натяжение нити и применять более податливые оправки. Доработка существующей конструкции на более податливую позволит использовать рамки толщиной 2 мм с исключением возможных поводок и деформаций, что значительно упростит данную технологическую операцию намотки и последующей разрезки.

Необходимо отметить, что употребление термина критический радиус намотки оправдано лишь для не очень податливых оправок: в нашем случае давление на оправку имеет максимальное для намоточного изделия значение и может характеризоваться как определяющий фактор напряженного состояния системы.

3) Изгибная жесткость нити

В процессе наматывания с натяжением T_0 проволока оказывает на поверхность радиусом r давление интенсивностью:

$$q = T_0/r \text{ (при угле намотки } \beta = 0);$$

При этом происходит резкий переход нити из прямолинейного положения в криволинейное, вследствие чего часть энергии растянутой нити затрачивается на деформацию изгиба. Фактическое давление витка на поверхности оправки снижается:

$$q = (T_0 - \Delta T)/r,$$

где ΔT представляет собой составляющую натяжения, эквивалентную влиянию изгибной жесткости нити.

При определении ΔT имеет смысл рассмотреть более общую задачу: исследовать распределение натяжений в жесткой нити, скользящей по неподвижной цилиндрической поверхности. Частный случай решения такой задачи, когда нить огибает поверхность без скольжения, даст ответ на интересующий нас вопрос: как влияет изгибная жесткость нити на ее натяжение в процессе наматывания (рис. 7).

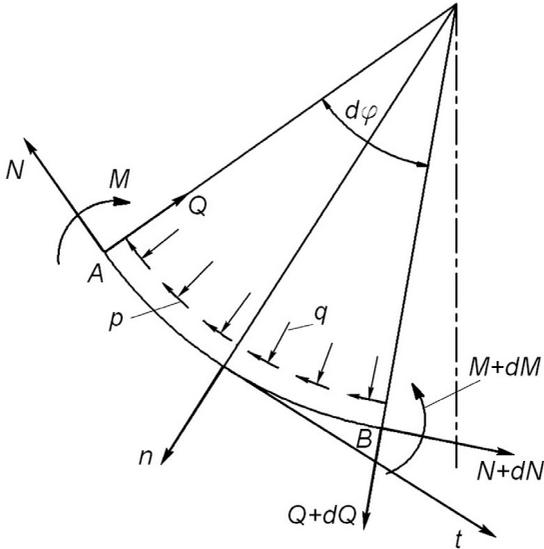


Рис. 7. Схема сил, действующих на элементарный участок нити

Решение задач выполнялось методами теории упругости (закон Гука) [4].

Введенные обозначения:

φ – координатный угол, отсчитываемый от вертикальной оси;

φ_1, φ_0 – углы, соответствующие точкам схода и набегаания нити на цилиндрическую поверхность;

T_1, T_0 – натяжение сходящей нити и набегающих витков нити (из-за наличия сил трения);

M, N, Q – соответственно изгибающий момент, нормальное и перерезывающие усилия;

q – интенсивность сил давления на единицу длины нити со стороны цилиндра;

p – удельная сила трения.

Полагаем, что силы q и p связаны соотношением Кулона: $p = fq$,

где f – коэффициент трения скольжения.

Проектируя силы на направления осей n, t и вычислив момент сил относительно точки B, пренебрегая при этом малыми членами, получим три уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} dQ/d\varphi &= N - qr & dN/d\varphi &= -Q + fq \\ dQ/d\varphi &= Qr \end{aligned} \quad (1)$$

Если предположить, что каждый участок изогнутой нити испытывает деформацию чистого изгиба, то должно выполняться равенство

$$1/r = M/(E_H J), \quad (2)$$

где J – осевой момент инерции сечения нити.

Подстановка (1) в уравнение равновесия (2) приводит к дифференциальному уравнению $dN/d\varphi = fN$, проинтегрировав его, получим известное соотношение Л. Эйлера:

$$N = T_0 \exp[f(\varphi - \varphi_0)], \quad (2)$$

а также закон изменения давления вдоль линии скольжения:

$$q = (T_0/r) \exp[f(\varphi - \varphi_0)].$$

Выполнив ряд преобразований и подстановок, получили зависимости, учитывающие изгибную жесткость нити.

Расчетные формулы натяжения и давления нити, изогнутой на цилиндрическую поверхность при отсутствии скольжения (случай намотки):

$$N = T_0 - E_H J / r^2; \quad q = T_0 / r - E_H J / r^3 \quad (4)$$

где $E_H = 2,25 \times 10^{11}$ Па – модуль упругости для сплава на кобальтовой основе;

$$J = \frac{\pi d^4}{64} \quad \text{– осевой момент инерции сечения нити, м}^4; \quad (5)$$

r – радиус изогнутой нити.

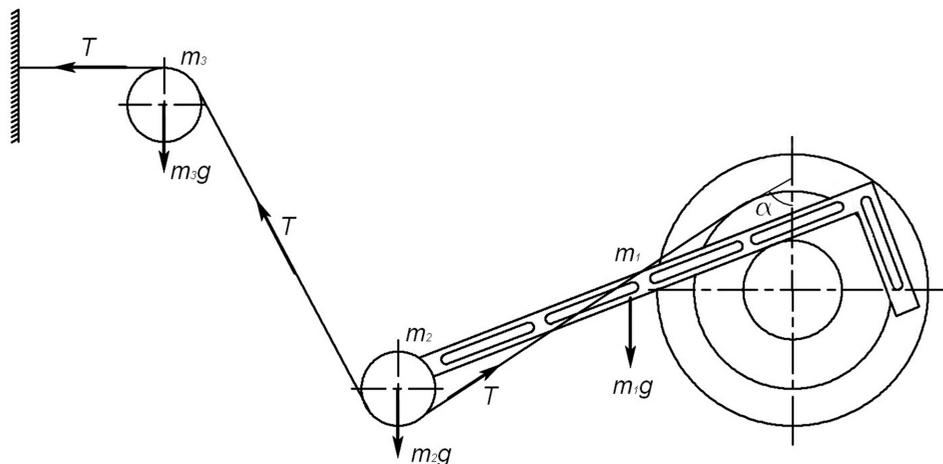


Рис. 8. Схема нитенатяжного устройства при изготовлении ШЦУ

Выполним расчет натяжения нити T_0 (рис. 8) [5]:
В соответствии со вторым законом Ньютона запишем уравнение:

$$m_1g + m_2g + m_3g - T_0\sin\alpha = 0$$

$$T_0 = g \frac{(m_1 + m_2 + m_3)}{\sin\alpha} \quad (6)$$

$$T_0 = 9,81 \frac{0,250}{\sin 55^\circ} = 3\text{Н}$$

Найдём осевой момент инерции сечения нити из формулы (5):

$$J = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3,14 \times (0,07 \times 10^{-3})^4}{64} = 1,18 \times 10^{-18} \text{ м}^4$$

Подставив числовые значения T_0 , $E_{\text{н}}$, J в формулы (4), найдем натяжение нити и давление с учетом изгибной жесткости при $r = 2$ мм:

$$N = T_0 - \frac{E_{\text{н}}J}{r^2} = 3 - \frac{2,25 \times 10^{11} \times 1,18 \times 10^{-18}}{(2 \times 10^{-3})^2} = 2,93\text{Н}$$

$$q = \frac{T_0}{r} - \frac{E_{\text{н}}J}{r^3} = \frac{3}{2 \cdot 10^{-3}} - \frac{2,25 \cdot 10^{11} \cdot 1,18 \cdot 10^{-18}}{(2 \cdot 10^{-3})^3} = 1467 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Подставив числовые значения T_0 , $E_{\text{н}}$, J в формулы (4), найдем натяжение нити и давление с учетом изгибной жесткости при $r = 4$ мм:

$$N = T_0 - \frac{E_{\text{н}}J}{r^2} = 3 - \frac{2,25 \cdot 10^{11} \cdot 1,18 \cdot 10^{-18}}{(4 \cdot 10^{-3})^2} = 2,98\text{Н}$$

$$q = \frac{T_0}{r} - \frac{E_{\text{н}}J}{r^3} = \frac{3}{4 \cdot 10^{-3}} - \frac{2,25 \cdot 10^{11} \cdot 1,18 \cdot 10^{-18}}{(4 \cdot 10^{-3})^3} = 745 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Из расчета видно, что при увеличении жесткости оправки натяжение нити меняется незначительно, а давление на оправку снижается в два раза, однако отрицательный эффект полностью не устраняется. Следовательно, можно сделать вывод (п. 1), что верхние слои оправки необходимо выполнять из податливого материала.

4) Реологические свойства нити

Реологические свойства материала – это совокупность свойств, определяющих способность материала изменять во времени напряженно-деформированное состояние при нагрузках и действии механических сил. К основным реологическим свойствам материала относятся: упругость, пластичность, вязкость, ползучесть и релаксация напряжений.

Реологические свойства нити характеризуют изменение (рост) во времени деформаций при постоянном натяжении (явление ползучести) либо изменение (падение) напряжений при постоянной деформации в растянутой нити (явление релаксации). Ползучесть и релаксация напряжений связа-

ны с переходом упругих деформаций в пластические, необратимые.

Сложное реологическое поведение материала нити можно изучать теоретически и экспериментально. Теоретический метод исследования заключается в установлении зависимости между действующим натяжением нити и его изменением во времени. Экспериментально данные свойства определяются при постоянной деформации тела намотки. В данной работе экспериментальное определение является более целесообразным и обусловлено тем, что процесс релаксации напряжений в разных слоях происходит неодинаково из-за различия во времени формирования этих слоев: релаксация раньше начинается в слоях, ближе расположенных к оправке. Проявление реологических свойств в значительной мере зависит от материала нити, факторов окружающей среды (влажности, температуры), но решающим является уровень напряжённого состояния.

5) Усилие прижима фрикционного цилиндра

При формировании тела намотки боковая поверхность катушки с проволокой находится в контакте с фрикционом цилиндрической формы. Усилие прижима фрикциона влияет на качество намоточного изделия и распределение в нем внутренних сил и регулируется на основе экспериментально-расчетного анализа.

6) Колебания натяжения нити при намотке, вызванные движением нитераскладчика

В процесс наматывания всегда присутствуют факторы, в основном динамического характера, придающие натяжению нити переменный характер. Это эксцентриситет оправки, биение шпинделя, на котором крепится оправка, возвратно-поступательное движение нитеводителя. Если первые два фактора возникают вследствие технологических или конструктивных дефектов отдельных элементов приемно-намоточных механизмов и могут быть ликвидированы при более тщательном изготовлении, то третий фактор является принципиально неустранимым, неизбежно сопутствующим процессу намотки. Задача заключается в том, чтобы правильно оценить степень влияния этого фактора на исследуемый процесс и указать пути снижения его вредного воздействия.

Периодическая форма закона изменения натяжения нити:

$$T_p = T_1 + T_a \sin \frac{\pi}{L} |\chi| \quad (7)$$

где T_1 , T_p – натяжение нити в среднем положении нитеводителя и в момент реверса;

T_a – амплитуда колебаний натяжения;

χ – координата от среднего положения нитеводителя ($-L/2 \leq \chi \leq +L/2$).

Общая длина нити, уложенной за половину хода нитеводителя:

$$l_1 = L/(2\sin\beta), \quad (8)$$

где β – угол намотки.

Общее удлинение нити:

$$\Delta l = \sqrt{l_1^2 + L^2/4} - l_1 \quad (9)$$

После ряда преобразований изменение натяжения нити, обусловленное смещением нитеводителя из среднего положения в крайнее [3]:

$$T_a = \frac{E_n F_0 (\sqrt{l_1^2 + L^2/4} - l_1)}{R/f + l_0 + l_1 + L/(\pi \sin\beta)} \quad (10)$$

где E_n ; F_0 – модуль упругости и площадь сечения нити;

f – коэффициент трения скольжения нити о ролик;

R – радиус ролика.

Так как в данной работе по изготовлению ЩУ используется рядовой вид намотки (угол намотки β близок к нулю), колебания натяжения нити по длине раскладки должны быть незначительны и соответственно оказывать влияние на напряженное состояние тела намотки не будут. Объясняется это тем, что слагаемое в знаменателе $L/(\pi \sin\beta)$ велико, а направленные силы инерции в момент реверса незначительны из-за малых ускорений движения нитеводителя.

Выводы

В результате подробно выполненного анализа операции намотки, и изучения ряда факторов,

влияющих на напряженное состояние тела намотки можно сделать вывод, что в процессе изготовления ЩУ ГТД определяющим фактором является жесткость оправки. Для устранения необратимых пластических деформаций в системе существует необходимость в применении оправок, верхний слой которых рекомендуется выполнять из податливых материалов.

В работе рассчитано натяжение проволоки и установлены зависимости натяжения проволоки и давления, оказываемого на оправку в процессе наматывания с учетом изгибной жесткости нити. Определены оптимальные конструкторско-технологические параметры оправки для намотки.

Литература

- [1] Замковой В.Е. Выбор материала для щеточный уплотнений ГТД / В.Е. Замковой, Э.В.Кондратюк, С.Д. Зиличихис [и др.] // Технологические системы. – 2010. – №3.
- [2] Исследование №622/04 проволоки из сплава Наупес25. – Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 2004. – 5 с.
- [3] Сухарев В.А. Расчет тел намотки / В.А. Сухарев, И.И. Матюшев. – М. Машиностроение, 1982, – 136с., ил.
- [4] Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости / М.М. Филоненко-Бородич – М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1959, – 364 с., ил.
- [5] Зубов В.Г. Механика / В.Г. Зубов – М. «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1978, – 351 с., ил.

Kondratyuk E.V., Zilichikhis S.D., Grebennikov M.A., Yemelyanova L.L.

Zaporozhye Machine-Building Design Bureau Progress State Enterprise named after Academician A. G. Ivchenko. Ukraine, Zaporozhye

DETAILED RESEARCH OF WINDING FOR GTE BRUSH SEAL FABRICATION

Winding processes of filament are researched and analysis of distinctive characteristics of winding physical-mechanical properties is carried out. An influence of different factors on winding stressed state during GTE brush seal manufacturing have been studied in detail. As a result, the calculations of wire tension and pressure on arbor during winding with a glance bending stiffness are presented. An optimal engineering and design parameters of winding are determined.

Keywords: brush seal; wire; filament; tension; winding; arbor; strain.

**References**

- [1] Zamkovej V.E. Vibor materiala dlya shetochnyh uplotnenij GTD / V.E. Zamkovej, E.V. Kondratyuk, S.D. Zilichikhis [i dr.] // Tehnologicheskie sistemy. – 2010 – №3.
- [2] Issledovanie №622/04 provoloki iz splava Haynes25. – Zaporozhye, GP ZMKB «Progress» im. A.G. Ivchenko., 2004. – 5 s.
- [3] Suharev V.A. Raschet tel namotki / V.A. Suharev, I.I. Matyushev. – M. Mashinostroenie, 1982, – 136 s., il.
- [4] Filonenko-Borodich M.M. Teoriya uprugosti / M.M. Filonenko-Borodich – M. Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literaturi, 1959, – 364 s., il.
- [5] Zubov V.G. Mehanika / V.G. Zubov – M. «Nauka» Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literaturi, 1978, – 351 s., il.