

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА ДЛЯ ГИБКОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ РАПИРЫ

В.М. ЕЛФИМОВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина)

Принципиально новым шагом в проектировании деталей из композитных материалов является возможность выбора жесткости и прочности материала в процессе разработки детали. Это требует не только обоснованного выбора исходных компонентов – армирующих волокон, связующих, наполнителей, но и оптимизированных по конечному результату структуры композита, технологии его изготовления и переработки в готовое изделие.

Сложность и трудоемкость проектирования любой детали определяется количеством критериев ее работоспособности. При использовании композита наряду с повышением степеней свободы конструктора при разработке детали за счет возможности проектирования материала повышается и размерность задачи.

Условия работы гибкой рапиры предъявляют к ее материалу и конструкции противоречивые требования [1...3].

С одной стороны, рапира должна обладать определенной гибкостью, позволяющей ей охватывать приводной орган. Возникающие при такой деформации напряжения не должны превышать предела выносливости материала рапиры. Это первый критерий работоспособности, который можно назвать критерием усталостной изгибной прочности.

С другой стороны, поперечные перемещения и угол поворота нитенесущей головки ограничены условиями нормальной нитепередачи, что требует значительной

величины изгибной жесткости рапиры. Это второй критерий работоспособности – критерий устойчивости первоначальной формы. К нему можно отнести статическую и динамическую устойчивость рапиры.

Для перфорированной рапиры требует решения вопрос обеспечения прочности перемычек при циклическом нагружении. Это третий критерий работоспособности, который можно назвать критерием неразрушения перемычек.

Помимо указанных прочностных критериев существует четвертый – триботехнический – это износостойкость поверхностных слоев материала рапиры при трении с другими деталями станка в процессе ее движения.

Современные полимерные композиты обладают широким спектром механических свойств, а также способностью к их направленному изменению в соответствии с назначением детали. За направленный характер свойств композита приходится платить сравнительно низкими характеристиками межслойного сдвига и прочности и жесткости в направлениях, не совпадающих с направлением армирования.

При изгибе рапиры на приводном органе в общем случае в полимерном композите могут возникать нормальные и касательные напряжения. Величина максимальных нормальных напряжений (растяжения и сжатия) определяется по формуле [4]:

$$\sigma_{\max} = Eh / D, \quad (1)$$

где E – модуль упругости композита в направлении оси рапиры; h – толщина рапиры; D – диаметр приводного органа.

Эти значения нормальных напряжений возникают на максимальном расстоянии от нейтральной плоскости рапиры при изгибе, то есть на боковых поверхностях рапирной ленты.

При постоянном радиусе кривизны рапиры имеем случай чистого изгиба, при котором касательные напряжения равны нулю. По этой причине опасаться межслойного разрушения композита, когда сопротивление разрушению оказывает только связующее, нет оснований и оценку прочности рапиры при изгибе на приводном органе можно производить только по нормальным напряжениям.

Действующие напряжения в зоне перемычек можно определять по формулам

$$\sigma_{\text{сж}} = F_{\text{ин}} / A_{\text{сж}}, \quad \tau_{\text{сдв}} = F_{\text{ин}} / A_{\text{сдв}}, \quad (2)$$

где $F_{\text{ин}} = (m_{\text{г}} + m_{\text{р}})a_{\text{max}}$ – инерционная сила; $A_{\text{сж}} = hb_3$, $A_{\text{сдв}} = h\ell_{\text{пер}}$ – площади контакта и сдвига соответственно; $m_{\text{г}}$, $m_{\text{р}}$ – масса нитенесущей головки и масса рапиры; a_{max} – максимальное ускорение рапиры; b_3 – ширина зуба приводного органа; $\ell_{\text{пер}}$ – длина перемычки; $\sigma_{\text{сж}}$ – напряжения сжатия в зоне контакта зуба приводного органа и перемычки; $\tau_{\text{сдв}}$ – напряжения сдвига, которые стремятся сместить перемычку в направлении оси рапиры.

В соответствии с полем действующих в рапире напряжений наиболее целесообразно ортогональное армирование композита. Количество поперечных волокон определяется расчетом по формулам (2).

Оценка возможности применения различных типов волокон в соответствии с первым и третьим критериями работоспособности была проведена при следующих исходных данных: $D=400$ мм; $h=2,5$ мм; $b_{\text{рап}} = 15,6$ мм; $\ell = 1000$ мм; $m_{\text{г}} = 0,16$ кг; $n_{\text{в}} = 230$ мин⁻¹; $b_{\text{перф}} = 7$ мм; $n_{\text{перф}} = 20$. Здесь $b_{\text{рап}}$ – ширина рапиры; ℓ – длина рапиры; $n_{\text{в}}$ – число оборотов главного вала; $b_{\text{перф}}$ –

ширина перфораций; $n_{\text{перф}}$ – число перфораций. Величины $m_{\text{г}}$, $n_{\text{в}}$ взяты из [3].

Расчеты показывают (формулы (2)), что при этих данных $\sigma_{\text{сж}}$ не превышают 5 МПа, $\tau_{\text{сдв}} = 1$ МПа. Предел усталости эпоксидной смолы (наиболее перспективного для данного случая связующего) составляет (10...30) МПа, то есть одно связующее может обеспечить прочность перемычек при циклическом нагружении в процессе колебательного движения рапиры.

В связи с вышесказанным сравнение применимости различных волокон для изготовления рапиры было проведено на примере однонаправленных композитов. В случае необходимости помещения части волокон в поперечном направлении (например, для обеспечения большей надежности по третьему критерию или по технологическим причинам) будут снижаться модуль упругости и предел прочности композита в осевом направлении, но одновременно будут снижаться и значения действующего $\sigma_{\text{ц}}$ и допустимого $[\sigma_{\text{ц}}]$ изгибных напряжений цикла (табл.1). Следовательно, выводы, полученные путем сравнения однонаправленных композитов, в первом приближении должны сохранить свою силу.

Модуль упругости $E_{\text{км}}$ и предел прочности $\sigma_{\text{в км}}$ однонаправленных композитов определяли с помощью уравнения аддитивности (правила смесей) [5]:

$$E_{\text{км}} = E_{\text{в}} V_{\text{в}} + E_{\text{с}} V_{\text{с}};$$

$$\sigma_{\text{в км}} = \sigma_{\text{вв}} V_{\text{в}} + \sigma_{\text{м}} V_{\text{с}},$$

где $E_{\text{в}}$, $\sigma_{\text{вв}}$, $V_{\text{в}}$ – модуль упругости, предел прочности и объемное содержание волокон соответственно; $E_{\text{с}}$, $\sigma_{\text{м}}$, $V_{\text{с}}$ – модуль упругости, напряжение в связующем в момент разрушения волокон и объемное содержание связующего соответственно.

Имеющиеся экспериментальные данные по разрушению слоистых ортогонально армированных композитов с приемлемой для инженерных расчетов точностью можно описать уравнением срока службы при усталостном нагружении [6]:

$$\frac{\sigma_{ц}}{\sigma_{в км}} = 1 - 0,1 \log n_{ц},$$

где $\sigma_{ц}$ – амплитуда приложенного напряжения, $n_{ц}$ – число циклов нагружения.

Зарубежные рапиры выдерживают более $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения, поэтому допусковое напряжение цикла $[\sigma_{ц}] \approx 0,25 \cdot \sigma_{в км}$. Результаты оценки применимости различных волокон в перфорированной гибкой рапире представлены в табл. 1.

Таблица 1

Однонаправленный композит, армированный волокнами	Характеристики				
	$E_{км}$, МПа	$\sigma_{в км}$, МПа	$\epsilon_{пред}$, %	$\sigma_{ц}$, МПа	$[\sigma_{ц}]$, МПа
Стекланными	57000	1750	3...5	356	437
Органическими	72000	1800	3...5	450	450
Угольными (высокопрочными)	180000	1100	0,5...1,0	1130	275
Полиэфирными (лавсан)	9000	500	8...30	56,5	125
Полиамидными (капрон)	1500	480	20...25	9,3	120

Свойства базальтовых волокон близки к свойствам стекловолокон типа Е и в таблице не представлены.

Как видно из табл. 1, $30 \cdot 10^6$ циклов изгиба выдержат ($[\sigma_{ц}] \geq \sigma_{ц}$) рапиры с применением стекланных, органических, лавсановых и капроновых волокон (в последних двух случаях с существенным запасом).

Угольные волокна не проходят как по напряжениям цикла, так и по предельной деформации $\epsilon_{пред}$. Возникающая при изгибе рапиры деформация составляет 0,625%.

Стекланные волокна не могут быть использованы из-за большого абразивного изнашивания контактирующих с ними деталей станка. Композиты на основе органических волокон, кроме отсутствия запаса по усталостному изгибному разрушению, не могут быть использованы также по причине плохой сопротивляемости напряжениям сжатия. Следовательно, перспективными являются лавсановые и капроновые волокна.

В целях обеспечения второго критерия работоспособности требуются более жесткие волокна (первые три строки табл. 1). Оценка работоспособности рапиры в этом случае связана с решением задач о ее продольных и изгибных колебаниях, статической и динамической устойчивости. Задачи, строго говоря, оказываются взаимосвязанными. Для того, чтобы оценить статическую устойчивость рапиры, нужно знать

ускорения различных поперечных сечений рапиры и головки. В связи с этим необходимо решить задачу о продольных колебаниях.

Оценку динамической устойчивости можно провести, зная величины собственных частот изгибных колебаний рапиры. Но это делается, как правило, на этапе проверочных расчетов. Для проекторочного расчета допустимо произвести оценку статической устойчивости рапиры, пренебрегая ее упругим деформированием.

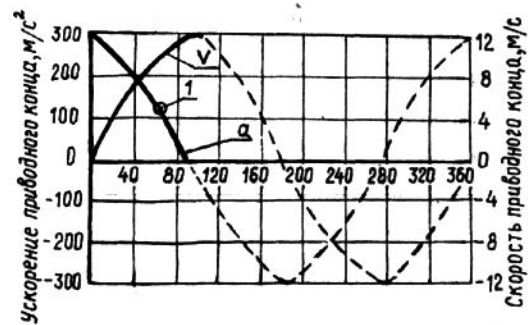


Рис. 1

На рис. 1 изображены кривые изменения скорости и ускорения сечений рапиры. В данном случае они одинаковы для всех сечений. Кривые построены с использованием исходных данных [3]. Выводы об устойчивости рапиры, сделанные в [3], справедливы только для абсолютно жесткой рапиры, у которой длина в процессе движения остается постоянной. Гибкая рапира в начальный момент, когда действует максимальное ускорение, имеет длину, на ко-

торуую воздействуют инерционные силы, равную нулю. Следовательно, она не может потерять устойчивость.

В момент максимальной скорости длина выбега гибкой рапиры равна половине ее общей длины, но ускорение и инерционная сила при этом равны нулю, поэтому опасность потери устойчивости гибкой рапиры возникает в какой-то промежуточный момент и при этом сжимающая инерционная сила будет меньше, чем указано в [3].

Расчеты показывают, что для обеспечения устойчивости рапиры постоянной длины, не имеющей дополнительных опор (склизов), при указанных выше данных требуется модуль упругости не меньше $2 \cdot 10^5$ МПа, то есть рапира должна быть изготовлена из стали или из однонаправленного композита, армированного высокомодульным угольным волокном, что неприемлемо ни в том, ни в другом случае.

Рапира постоянной длины, изготовленная из однонаправленного композита, армированного капроновыми волокнами ($E_{км} = 1000$ МПа), сохраняет устойчивость прямолинейной формы только при постановке восьми дополнительных опор (склизов).

Расчет гибкой рапиры (с переменной длиной выбега) из композита с применением капроновых волокон показывает, что для обеспечения статической устойчивости достаточно трех дополнительных опор. При $E_{км} = 2000$ МПа будет достаточно и двух.

Наиболее опасный момент времени в отношении потери устойчивости гибкой рапиры наступает при длине выбега, равной 310 мм. Время от начала движения при этом составляет ~0,2 времени одного цикла движения рапиры. На рис. 1 эта точка обозначена цифрой 1 и обведена кружочком.

Наиболее целесообразная технология изготовления рапир предполагает изготовление на первом этапе листов из композита с примерными размерами $l \times l/2 \times h$. Как правило, изделия с большой плоской поверхностью получают прессованием.

В этом случае целесообразно применение композитов, армированных тканями (текстолитов), по причине их высокой технологичности при изготовлении крупногабаритных изделий. Кроме того, они защищают от рассыпания волокон композита при прессовании. Прочность и жесткость тканых материалов при нагружении в направлении нитей основы и утка определяется числом, прочностью и жесткостью соответствующих волокон.

Для улучшения триботехнических характеристик в состав текстолитов добавляют твердые смазочные материалы или пластмассы, обладающие хорошими антифрикционными свойствами. Для этих целей используют графит, дисульфид молибдена, фторопласт и другие материалы.

В соответствии с изложенным алгоритмом был спроектирован композит [7], изготовлены гибкие перфорационные рапиры на основе лавсановой ткани толщиной 0,1 мм, которые выдержали более $30 \cdot 10^6$ циклов нагружения при испытаниях, проведенных на одной из московских фабрик.

ВЫВОДЫ

1. Разработана система критериев работоспособности и расчета гибкой перфорированной рапиры из полимерного композита и проведен анализ применимости для изготовления рапиры различных химических волокон (крупнотоннажных и специального назначения – высокопрочных и высокомодульных).

2. Подтвержден вывод о перспективности применения (для серийного изготовления) гибких рапир композитов, армированных тканями на основе волокон типа лавсан и капрон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дицкий А.В., Малафеев Р.М., Терентьев В.И., Туваева А.А. Основы проектирования машин ткацкого производства. – М.: Машиностроение, 1983.
2. Талавашек О., Святый В. Бесчелночные ткацкие станки. – М.: Легпромбытиздат, 1985.
3. Ормирод А. Современное пригетовительное и ткацкое оборудование. – М.: Легпромбытиздат, 1987.

4. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1979.

5. Композиционные материалы: Справочник. – Киев: Наукова Думка, 1985.

6. *Рейфснейдер К.* Повреждение конструкций из композитов в процессе эксплуатации /В кн. Прикладная механика композитов. –М.: Мир, 1989. С.108...142.

7. Свидетельство на полезную модель №18512 РФ. Рапирная лента /Елфимов В.М. и др. Владелец МГТУ им.А.Н.Косыгина. Приоритет от 17.11.2000 г.

Рекомендована кафедрой деталей машин и подъемно-транспортных устройств. Поступила 30.09.04.
