

Прочность и разрушение синтетических лент пакетирующих стропов в исходном состоянии и с наработкой

В. И. Скрипченко^а, В. А. Стрижало^б, М. П. Земцов^а, М. В. Бородий^а

^а Научно-сертификационный центр “Стандарт”, Киев, Украина

^б Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены результаты натурных испытаний многоветвевых пакетообразующих стропов при нагружении по трапецидальному циклу. Работоспособность материала ленты стропов оценивалась путем сопоставления ее прочности в исходном состоянии и после наработки. Предложен параметр для оценки поврежденности полимерного материала при выдержке под нагрузкой, позволяющий определить остаточную прочность ленты при известной истории нагружения. При циклическом нагружении стропов существенно снижается прочность лент, что обуславливает уменьшение фактического коэффициента запаса прочности стропа. Расчет номинальной грузоподъемности пакетообразующих стропов следует выполнять с учетом значения разрывного усилия испытанной после наработки ленты.

Ключевые слова: средства пакетирования грузов, строп, синтетическая лента, полимер, вязкоупругость, прочность, поврежденность, наработка.

Введение. Оптимизация процесса погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ основывается на рациональном использовании современных технологий формирования транспортных пакетов тарно-штучных грузов. Из имеющегося многообразия разработанных конструкций и вариантов выполнения таких изделий большой интерес представляют одноразовые средства формирования транспортных пакетов на базе тканых лент из синтетических материалов, что позволяет существенно снизить стоимость погрузочно-разгрузочных работ и исключить расходы по возврату тары, неизбежные при использовании многооборотных средств пакетирования. В таких ленточных системах, собственно, ленты выполняют двойную функцию. С одной стороны, с их помощью формируется транспортный пакет, с другой – они являются несущими элементами, воспринимающими вес пакета грузов в выполняемых технологических циклах (отсюда также другое название подобных систем – ленточные многоветвевые пакетообразующие стропы; далее стропы). При использовании именно этих средств скрепления грузов необходимо обеспечить гарантированную прочность и надежность эксплуатации изделия на протяжении ограниченного срока службы, предполагающего возможность осуществления некоторого регламентированного числа рабочих циклов. Определение допустимой нагрузки на строп и количества циклов нагружения (погрузки–разгрузки) осуществляется либо путем расчета с учетом нормированного коэффициента запаса прочности [1] и данных о прочности ленты в исходном состоянии, либо эмпирически по результатам испытаний одно- и многоразовых грузовых систем аналогичного назначения [2].

В качестве основных факторов, влияющих на снижение прочностных и деформационных характеристик тканых синтетических лент стропов, которые необходимо учитывать при исследовании их кинетических свойств [3], следует отметить уровень приложенной нагрузки и длительность ее воз-

действия. Двойственная природа сил связи в полимерах предполагает возможность реализации двух видов механического разрушения: собственно молекул материала и смещение молекулярных цепей относительно друг друга [3], хотя соотношение вкладов каждого из них в развитие процесса разрушения полимера неизвестно. Однако то, что возникающая при реализации этого процесса повреждаемость синтетического материала ленты в результате изменения структурной упаковки молекулярных цепей приводит к существенному снижению остаточной прочности и работоспособности изделия в целом, не вызывает сомнения. Установленная методом поляризационной ИК-спектроскопии корреляция прочности полимерных волокон и ориентации макромолекул в аморфных телах [3] подтверждает необходимость проведения экспериментальных исследований с целью разработки феноменологического подхода к прогнозированию долговечности и остаточной работоспособности изделий из полимерных материалов по данным текущей диагностики.

Особенность механического поведения полимеров под нагрузкой состоит в проявлении эффекта вязкоупругости, характеризующегося разворачиванием цепных молекул материала во время действия нагрузки и их свертыванием после разгрузки. Движению молекулярных цепочек препятствуют силы вязкого сопротивления [4]. При больших скоростях деформации вязкоупругие свойства материала проявляются незначительно, в то время как в случае его выдержки при больших нагрузках они проявляются максимально. Применительно к рассматриваемому типу стропов в процессе трехэтапной транспортно-складской операции (нагрузки до наибольшего значения при подъеме груза, перемещения под нагрузкой и разгрузки) накопление повреждений в лентах, обуславливающее общее снижение несущей способности стропов, наиболее интенсивно происходит именно на втором этапе перегрузочного цикла.

Методика испытаний. Объектом исследования служил одноразовый четырехветвевой пакетообразующий строп (номинальная грузоподъемность 21 кН), изготовленный из цельного отрезка полипропиленовой ленты (рис. 1). Концы лент сшиты на участке длиной 700 мм в нижней части. Основу ленты составляет полипропиленовая фибрированная нить (ТУ У 6-05763429.020-96) плотностью 400 текс (текс – масса 1000 м нити в граммах), уток – нить полиамидная жгутовая (ТУ У 6-05763429.017-96) плотностью 250 текс. Плетение – комбинированное. Ширина ленты составляет 68 мм, плотность (число нитей) по основе – 86 ± 3 , по утку – 8 ± 2 на 10 мм, линейная плотность – 36 ± 3 г/м.

Методика натурных испытаний пакетообразующих стропов основывается на моделировании реальных условий их эксплуатации. Предполагалось, что в процессе использования стропа число циклов нагрузка–разгрузка не превышало 10, а время выдержки под нагрузкой составляло не более 300 с. Для проведения натурных испытаний стропов использовался жесткий стальной контейнер коробчатой конструкции, размеры которого соответствовали размерам формируемого пакета грузов, что позволяло загружать его стальной дробью общей массой до 200 кН. На нижней и верхней распорных рамах по месту охвата лентами были закреплены деревянные накладные с направляющими пазами, имеющими скругление радиусом $R = 120$ мм.

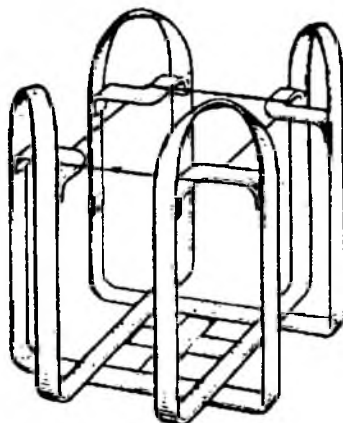


Рис. 1. Общий вид четырехветвевового пакетобразующего стропа.

Для подъема контейнера с грузом использовали электротельфер грузоподъемностью 50 кН. Ленты петель пакетобразующего стропа, сложенные вдвое, набрасывались на крюки стального симметричного четырехветвевового стропа, который был подвешен на крюк тельфера. Уровень нагруженности стропа (вес груза с учетом веса контейнера) измеряли динамометром ДПУ-5 с ценой деления 1 кН. При нагружении стропа несущие ленты имели возможность проскальзывать в пазах накладок ребер контейнера, обеспечивая тем самым симметрию распределения и самоуравновешенность приложенных к стропу усилий. При испытаниях нагрузки превышали эксплуатационные в 1,25–2,0 раза. Нагружение стропов осуществлялось по трапецидальному циклу с выдержкой при максимальной нагрузке в течение 180...300 с и $N = 10$ цикл. Влияние эксплуатационной наработки на прочность ленты определялось на образцах, вырезанных из наиболее поврежденных участков (места перегиба лент на крюках четырехветвевового стального стропа и места трения ленты о накладку рам контейнера) пакетобразующих стропов после испытания по описанной выше методике.

Ленты в исходном состоянии и после наработки испытывали на статический разрыв на машине “Instron-1126” в жестком режиме нагружения (скорость перемещения подвижной траверсы составляла 0,003 м/с). Для исследования процесса накопления повреждений в материале лент стропа при выдержке под грузом образец неповрежденной ленты нагружался до заранее принятого значения и выдерживался в таком состоянии до разрушения. Время от момента достижения нагрузкой заданной величины до разрушения регистрировалось. Релаксация нагрузки вследствие проявления эффектов вязкоупругости полимерного материала ленты устранялась в автоматическом режиме. Относительная погрешность измерения нагрузки не превышала $\pm 1\%$ измеряемого значения. Длина рабочей части образца ленты составляла 200 мм [5].

Для получения корректных результатов испытания лент в исходном состоянии, после наработки и выдержки важно создать однородное напряженное состояние рабочей части исследуемых образцов. Необходимо также обеспечить такое крепление образца в захватах испытательной машины,

чтобы его разрушение происходило в рабочей части в зоне равномерного деформационного поля. В результате анализа возможных [6] и регламентированных [5] способов крепления ленты в захватах испытательной машины предложен эффективный способ ее фиксации на основе комбинированного зажима. Это позволяет заправлять ленту без перекосов и складок, что обеспечивает ее равномерное деформирование в процессе нагружения (рис. 2). Действительно, предварительные испытания подтвердили, что использование клиновидных захватов [5] даже с подкладками из низко модульных материалов не позволяет, во-первых, избежать перекоса, а следовательно, неравномерности нагружения волокон основы ленты, и, во-вторых, зачастую приводит к разрушению ленты непосредственно в зажимных губках, что искажает величину истинного разрывного усилия и требует проведения повторных испытаний. Для закрепления образца в захвате конец ленты оборачивается вокруг барабана и заправляется в паз, где фиксируется с помощью клина. С целью обеспечения однородности напряженно-деформированного состояния ленты в рабочей части необходимо строго соблюдать параллельность цилиндрических поверхностей барабанов. Кроме того, верхний захват имеет возможность проворачиваться относительно оси пальца, который крепится на подвижной траверсе испытательной машины. Нижний захват устанавливается таким образом, чтобы оси рабочего отрезка ленты и измерительного устройства совпадали. Это позволяет уменьшить возможную погрешность измерения нагрузки.

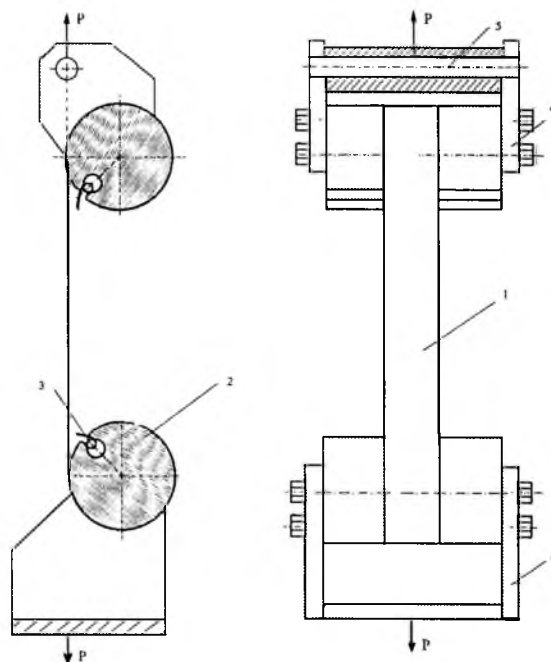


Рис. 2. Устройство для закрепления ленты при испытании на разрыв: 1 – лента; 2 – барабан улитки; 3 – клин; 4 – пластины; 5 – ось нагружения.

При исследовании прочности лент в исходном состоянии важно было учитывать возможную погрешность результатов, обусловленную наличием в

ленте технологических дефектов, количество и вид которых регламентируются [7]. Дефекты в виде недосеки в 1-2 нити могут наиболее существенно влиять на снижение прочности ленты.

Результаты испытаний и их обсуждение. Результаты испытаний пакетобразующих стропов приведены в табл. 1, полученные значения разрывного усилия P и его стандартного отклонения σ для образцов ленты в исходном состоянии, с дефектами и вырезанных из стропа после наработки – в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Результаты натуральных испытаний пакетобразующих стропов

№ стропа	Количество образцов	N , цикл	P_{\max} , кН	$t_{\text{выд}}$, с	Примечание
1	2	10	26	300	Без разрушения
2	1	10	32	180	То же
3	3	10	32	300	» »
4	1	10	36	180	» »
5	1	10	36	300	» »
6	1	10	42	180	» »
7*	1	10	42	180	» »
8**	1	5	42	180	Разрыв ленты стропа на крюке

Примечание. Одной и двумя звездочками обозначено № стропа с предварительной наработкой до испытаний по программе $P_{\max} = 32$ и 26 кН соответственно, $N = 10$ цикл, $t_{\text{выд}} = 300$ с.

Т а б л и ц а 2

Разрушение образца ленты в исходном состоянии и после наработки

Состояние образца	Количество образцов	P , кН	σ , кН
Исходное	18	11,2	0,4
Исходное, лента с дефектами	12	11,0	0,25
После наработки, лента стропа № 8 (табл. 1)	9	9,0	1,6

Несмотря на структурную однородность ленты, в результате испытаний было получено несколько видов разрушения (рис. 3). Все типичные разрушения можно разделить на две основные группы: разрыв нитей основы по нормали к направлению действия приложенного усилия (рис. 3,а) либо под острым углом ($25 \dots 30^\circ$) к оси приложенной нагрузки (рис. 3,б,в). При этом не наблюдалось корреляции между величиной предельной нагрузки и видом разрушения. Диаграммы деформирования лент практически линейны, лишь при нагрузках, близких к разрушающим, отмечается незначительная нелинейность.

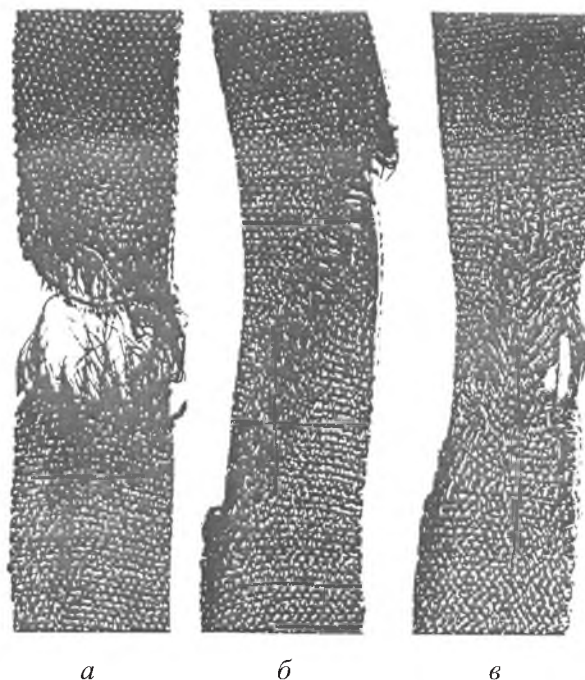


Рис. 3. Характерное разрушение образцов ленты при статическом растяжении.

При статическом разрыве лент с дефектами локализация зоны разрушения не всегда происходила по месту расположения последних. Но даже если разрушение происходило по дефекту, разрывная нагрузка при этом не обязательно соответствовала своему минимальному значению. Как следует из приведенных в табл. 2 результатов, прочность образцов с дефектами несколько ниже, чем образцов без дефектов, однако превышение величиной стандартного отклонения среднего разрывного усилия образцов лент без дефектов аналогичной характеристики образцов лент с дефектами позволяет считать несущественным влияние рассмотренного типа дефектов на прочность ленты.

Для образцов ленты после наработки имеет место существенное снижение прочности и более значительный разброс результатов. Если для лент с технологическими дефектами отмечено незначительное (до 2%) снижение прочности по сравнению с лентами без дефектов, то для лент после наработки это снижение достигает 20%. Следует, однако, отметить, что остаточная прочность “наработанной” ленты стропа на участках, не имеющих механического контакта с металлическим контейнером и крюками тельфера, даже при двукратном превышении номинальной грузоподъемности существенно отличается от прочности ленты в неповрежденном состоянии. Более того, это снижение практически незаметно для стропов, испытанных с меньшей перегрузкой от уровня номинальной эксплуатационной грузоподъемности. Например, остаточная прочность ленты стропа после десятикратного нагружения грузом 26 кН, что на 25% превышает его номинальную грузоподъемность, с выдержкой при максимальной нагрузке в течение 300 с практически совпадает с прочностью ленты в исходном состоянии.

Чтобы сформулировать критерий оценки влияния предварительной нагрузки на остаточную прочность ленты, достаточно эффективно можно использовать характеристику степени ее поврежденности. Естественно предположить, что наиболее интенсивно повреждение происходит при уровнях нагрузки, близких к предельным. Для оценки влияния времени выдержки ленты под нагрузкой на прочность образцы растягивали до заранее выбранного усилия, после чего выдерживали при этой нагрузке до разрыва. Время от момента достижения нагрузкой заданного значения до разрушения регистрировалось. На рис. 4 представлена зависимость времени до разрушения от уровня задаваемой нагрузки. По полученным результатам можно оценить накопленную поврежденность ленты во время выдержки при постоянной нагрузке. Этот параметр оценивали как отношение поврежденного объема волокон F_{Π} в месте разрыва к общему количеству волокон в сечении ленты F . Разрушающая нагрузка ленты без повреждений будет $P_p = \sigma_p F$, а поврежденной ленты – $P_{p,\Pi} = \sigma_p (F - F_{\Pi})$, где σ_p – разрушающее напряжение. На основании приведенных зависимостей поврежденность ленты можно оценивать с помощью формулы

$$\frac{F_{\Pi}}{F} = 1 - \frac{P_{p,\Pi}}{P_p}.$$

Поврежденность ленты при нагрузке 11,0 кН составила 1,8%, при 9,2 кН – 17,9%. При этом в первом случае лента разорвалась через 10 с после достижения заданного уровня нагрузки, во втором – через 840 с. Накопление повреждений под нагрузкой происходит неравномерно во времени. Так, например, при выдержке ленты под нагрузкой 9,2 кН в течение 600 с при линейном законе накопление повреждений должно было бы составить 12,8% (при выдержке 840 с оно составило 17,9%), что соответствует разрушающей нагрузке 9,8 кН. В действительности ленты при повторном нагружении выдерживают 10,8 кН.

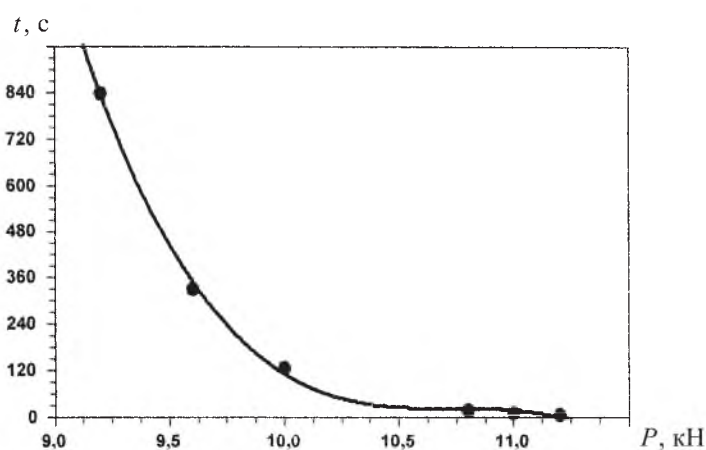


Рис. 4. Зависимость времени до разрушения ленты в исходном состоянии от уровня нагрузки.

Расчетная оценка номинальной грузоподъемности стропа, выполненная согласно методике [8], показала, что допустимый вес перемещаемого груза не должен превышать 10 кН (в расчете заложен шестикратный запас прочности стропа, т.е. теоретически максимальный вес поднимаемого груза может достигать 60 кН). Однако приведенные в табл. 1 результаты свидетельствуют, что уже нагрузка 42 кН при ограниченном числе циклов нагружения может привести к разрушению стропа из-за накопленных в его лентах повреждений. В то же время, если заложить в расчет фактическую прочность лент с наработкой, т.е. 9,0 кН, то максимальная нагрузка стропа не должна превышать 45 кН, что соответствует полученным результатам натуральных испытаний. Установлено, что расчетная прочность стропа выше фактической на 7%. Это может быть объяснено тем, что разрушенный строп (по данным табл. 1) имел дополнительную историю нагружения.

Выводы

1. Предложен параметр оценки поврежденности полимерного материала при выдержке под нагрузкой, позволяющий оценить остаточную прочность ленты при известной истории нагружения.

2. Интенсивное накопление повреждений при влиянии на ленту постоянных нагрузок, близких к разрушающим (82% предельного разрывного усилия), приводит к потере несущей способности в течение 840 с. Накопление повреждений при этом происходит нелинейно во времени. Единичные нагрузки, близкие к разрушающим, но действующие непродолжительно, не снижают прочность лент.

3. Циклическое нагружение пакетобразующих стропов приводит к существенному (до 20%) снижению прочности лент, что обуславливает уменьшение фактического коэффициента запаса прочности стропа.

4. Расчет номинальной грузоподъемности пакетобразующих стропов целесообразно выполнять с учетом значения разрывного усилия ленты, испытанной после наработки.

5. Технологические дефекты полипропиленовых лент типа недосек в 1-2 нити практически не влияют на прочность ленты при статическом разрыве.

Резюме

Розглянуто результати натурних випробувань пакетоутворюючих стропів при навантажуванні за трапецеїдальним циклом. Працездатність матеріалу стрічки стропів оцінювалась шляхом зіставлення її міцності в початковому стані та після напрацювання. Запропоновано параметр для оцінки пошкодження полімерного матеріалу при витримці під навантаженням, що дозволяє визначити залишкову міцність стрічки за відомої історії навантажування. За циклічного навантажування стропів суттєво знижується міцність стрічки, що зумовлює зменшення фактичного коефіцієнта запасу міцності стропа. Розрахунок номінальної вантажопідйомності пакетоутворюючих стропів необхідно виконувати з урахуванням значення розривного зусилля стрічки, що випробовується після напрацювання.

1. *ГОСТ 21650-76*. Средства скрепления тарно-штучных грузов в транспортных пакетах. Общие требования. – Введ. 01.01.77.
2. *Japanese Industrial Standart. Flexible Intermediate Bulk Containers*. – 1988. – JIS Z. – 1651. – 9 p.
3. *Лаврушин Г. А.* Прочность и долговечность средств пакетирования грузов. – М.: Транспорт, 1987. – 160 с.
4. *Лаврушин Г. А.* Работоспособность лент и канатов из синтетических нитей. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1991. – 201 с.
5. *ГОСТ 16218.5-82*. Изделия текстильно-галантерейные. Метод определения разрывной нагрузки и разрывного удлинения при растяжении. – Введ. 01.07.83.
6. *ISO 2307:1990*. Ropes Determination of Certain Physical and Mechanical Properties. – Introduced 15.09.90.
7. *ДСТ України 2038-92*. Ленты и тесьмы ременные. Общие технические условия. – Введ. 01.07.93.
8. *РД 31.45.03-82*. Устройства грузозахватные крановые. Типовые расчеты. Методика. – Введ. 01.01.83.

Поступила 17. 01. 2003