

УДК 676.056.4
ББК 35.77 я 7;
К647

Исследование деформационных свойств прессовых сукон бумагоделательных машин

М. В. Колычев, соискатель;
Н. Н. Кокушин, д. т. н.,
СПб ГТУ РП

Параметры контактного деформирования полотна бумаги или картона в прессовых частях бумаго- и картоноделательных машин (БКДМ) определяют эффективность обезвоживания в прессовой части, а также оказывают значительное влияние на сопротивление раздиранию, разрывную длину готовой продукции и др. Основными параметрами контактного деформирования в прессовой части являются ширина площадки контакта валов, среднее удельное давление прессования и распределение давления в зоне прессования. Для оптимизации работы существующих и создания эффективных новых прессовых частей БКДМ необходимо прогнозировать основные параметры контактного деформирования в зонах прессования в зависимости от основных конструктивных параметров. Первые попытки создания модели контактного деформирования тел в прессовом захвате были чисто эмпирическими [3,10]. В дальнейшем решение задачи контакта прессовых валов в рамках теории линейной упругости было дано в [2] с использованием

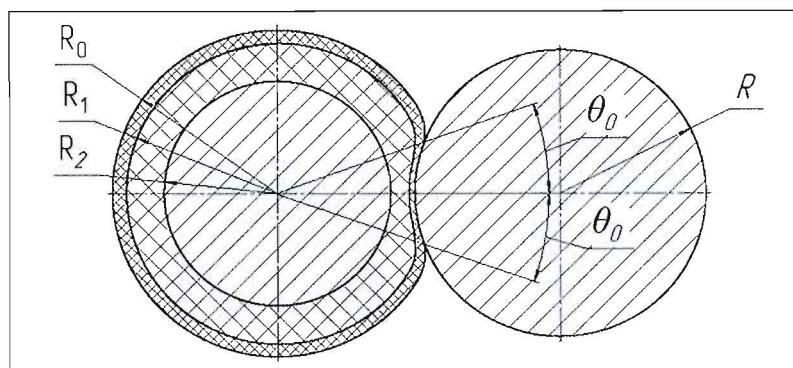


Рис. 1. Схема контакта двухслойного вала и жесткого контрвала

метода функциональных уравнений. Используем этот метод для изучения влияния сукна на ширину площадки контакта прессовых валов в рамках линейной теории упругости.

На рис. 1 представлена схема контакта прессовых валов и сукна.

В рамках подхода [2] изучается влияние упругих параметров верхнего слоя (сукна) двухслойного вала на ширину площадки контакта с контрвалом.

Так, на рис. 2 представлены результаты решения задачи контакта прессовых валов с учетом сукна для следующих исходных данных: прессовый вал диаметром 800 мм облицован несжимаемым (коэффициент Пуассона $\mu=0,499$) покрытием толщиной 25 мм с модулем упругости $E=10$ МПа, прес-

совое сукно (коэффициент Пуассона $\mu=0, 0,2$ и $0,4$) имеет толщину 2,75 мм и модуль упругости $E=0,25, 1$ и 2 МПа. Диаметр жесткого контрвала – 800 мм.

Приведенные результаты показывают, что применение методов линейной теории упругости дает некорректные результаты. Так, уже при небольших нагрузках ширина площадки контакта валов становится очень большой, чего не происходит на практике. Причина неверного решения состоит в том, что сукно сильно сжимается в прессовом захвате, таким образом деформации сукна становятся большими, и задача перестает быть линейной.

Разработка современной и адекватной модели контакта тел в прессовом захвате осложняется тем, что сукна

являются нелинейными материалами и допускают значительные относительные деформации (до 50 %). Отсюда модель контактного деформирования тел в прессовом захвате должна учитывать нелинейные законы механического поведения и большие деформации сукон [5, 11].

Нелинейное поведение материалов и большие деформации тел можно рассматривать только в рамках численных методов, наиболее мощным из которых является метод конечных элементов (МКЭ) [6, 8]. В настоящее время имеется множество отечественных и зарубежных программных комплексов, реализующих МКЭ для решения задач механики твердого тела. Таким образом, реализация численной модели контактного взаимодействия элементов прессовых захватов бумаго- и картоноделательных машин представляется возможной.

Для включения прессовых сукон в модель прессового захвата требуется информация об основных механических свойствах сукна, а также необходимо описать поведение прессовых сукон с использованием оптимальных по сложности определяющих соотношений.

Таким образом, целями настоящей работы являются экспериментальное изучение поведения материалов прессовых сукон, а также определение законов механического поведения прессовых сукон при сжатии.

Сукна

Прессовые сукна представляют собой иглопробивные материалы сложной структуры [7] (примеры см. на рис. 3), выполненные из волокон различной свивки и различных полимеров: кевлар, редон, уралон, полиэтилен и др. [5].

Сукна в прессовом захвате подвергаются главным образом деформации сжатия. Упругое деформирование прессовых сукон в зазоре прессовых валов

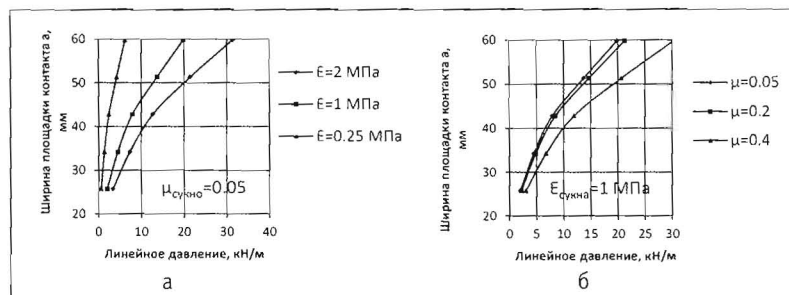


Рис. 2. Влияние упругих параметров сукна на ширину площадки контакта: а – влияние модуля упругости; б – влияние коэффициента Пуассона сукна

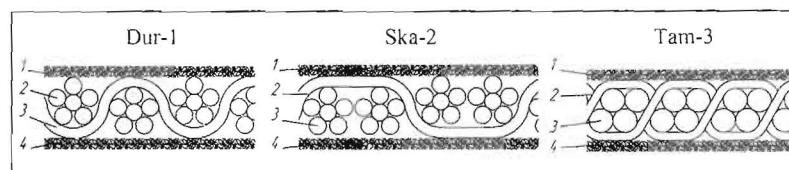


Рис. 3. Поперечное сечение сукна: 1 – верхняя ватка; 2 – поперечные нити основы; 3 – продольные нити основы; 4 – нижняя ватка

можно считать основным, поскольку неполное восстановление сукна после захвата приводит к уменьшению объема удерживаемой воды, росту давления в порах сукна и короблению бумажного полотна.

Для упрощения модели механического поведения сукна примем ряд упрощающих допущений:

- деформации сукон по ширине и в машинном направлении пренебрежимо малы и не влияют на поперечную деформацию;
- сукна внутри прессового захвата являются водонасыщенными;
- натяжение сукна не влияет на сухость бумажного полотна после прессовой части;
- сукно является упругим изотропным нелинейным материалом.

Для описания механического поведения прессовых сукон в рамках принятых гипотез используем определяющее соотношение Огдена–Хилла первого порядка [6, 9]. Оно имеет следующий вид

$$W = \frac{\mu}{\alpha} \cdot (\lambda_1^\alpha + \lambda_2^\alpha + \lambda_3^\alpha - 3) + \frac{\mu}{\alpha \cdot \beta} \cdot (J^{\alpha \cdot \beta} - 1),$$

где W – упругий потенциал;

α, β – материальные коэффициенты;

λ_i – главные растяжения;

μ – модуль сдвига.

Закон упругости Огдена–Хилла позволяет описывать упругие материалы и изделия, которые подвергаются значительным деформациям (до 100 %) и значительным изменениям формы. Его применяют для моделирования деформации поролона, пористых изделий и пен.

Для экспериментальной оценки упругих свойств прессовых сукон используем три различных иглопробивных сукна, обозначенных как **Dur-1**, **Ska-2** и **Tam-3**. Структура поперечного сечения сукон представлена на рис. 3.

Образцы сукон диаметром 42 мм вырубали из полотна сукна. На бумагоделательной машине сукно находится во влажном состоянии. С точки зрения сухости бумажного полотна после прессования влажность сукон перед прессовой частью в 30 % оптимальна, поскольку обеспечивает максимальную сухость полотна бумаги после прессования [4].

Для обеспечения влажности в 30% перед опытом образцы сукон взвешивали, сушили и выдерживали во влажной атмосфере. Основные характеристики сукон представлены в табл. 1.

Для проведения экспериментальных исследований использовался автоматизированный испытательный комплекс «КСИМ - 40», см. рис. 4.

В процессе эксперимента образец сукна помещался между двух шлифованных и полированных стальных пластин. В начале испытаний на пластины диаметром 50 мм и толщиной 4 мм устанавливались образцы. Полное количество образцов каждого вида сукна – 7. В процессе испытаний отдельные образцы отбраковывались. Для каждого вида сукна было испытано не менее 5-ти образцов. Температура образцов и окружающего воздуха в процессе эксперимента составляла 23 ± 2 °С. В процессе экспериментов скорость нагружения образцов была постоянной и составляла $12 \pm 0,3$ мм/мин.

На рис. 5а изображены экспериментально полученные ряды значений сила-перемещение для каждого образца сукна Dur-1. Через отдельные экспериментальные точки для каждого образца проведены гладкие кривые.

На рис. 5б построены графики математического ожидания зависимости сила-перемещение для сукон Dur-1, Ska-2 и Tam-3.

Таблица 1.

Характеристики исследуемых прессовых сукон				
Обозначение сукна	Масса, г/м ²	Влажность сукна в начале эксперимента, %	Толщина в абсолютно сухом состоянии, мм	Толщина во влажном состоянии, мм
Dur-1	1100	30	3,03	2,75
Ska-2	1000	30	3,53	3,40
Tam-3	1000	30	3,03	2,77

Проведем статистическую обработку полученных данных. Для этого сформируем по десять отсчетов перемещений во всем интервале изменения для каждого образца. В каждой фиксированной точке отсчета определяем математическое ожидание по пяти измерениям и среднеквадратическое отклонение. Для сукна Dur-1 максимальное среднеквадратическое отклонение составляет $\sigma_{\max} = 33$ мкм, коэффициент вариации – $v_{\max} = 4,2$ %.

На рис. 6 изображены кривые возникающее напряжение – деформация сукон.

прессовых сукон использовался метод наименьших квадратов (МНК), реализованный в большинстве комплексов конечно-элементного анализа, например, в системе Code_Aster.

Метод наименьших квадратов состоит в минимизации суммы квадратов отклонений напряжений σ_i относительно величин, предсказанных законом упругости материала:

$$L = \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma(\varepsilon_i, b_0, b_1, \dots, b_m))^2 \rightarrow \min,$$

где $b_0, b_1, \dots, b_m$ – упругие постоянные;

n – количество экспериментальных точек;

ε – относительная деформация.

Метод наименьших квадратов может быть реализован в двух версиях – ненормализованный и нормализованный методы:

$$L_{\text{норм}} = \sum_i (\sigma_{i \text{ данное}} - \sigma_{i \text{ вычисленное}})^2 \rightarrow \min$$

Подбор закона упругого поведения прессовых сукон

Для подбора определяющих соотношений поведения материалов

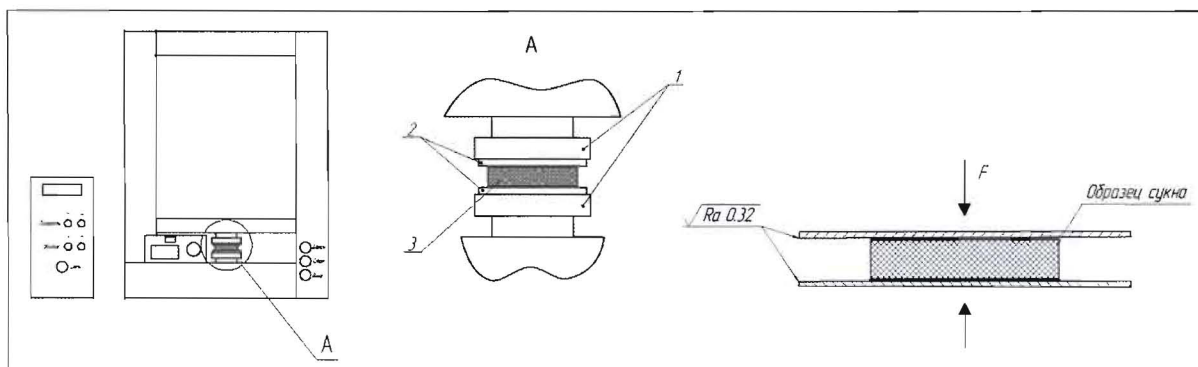


Рис. 4. Захват испытательной машины для сжатия образцов: 1 – испытательные захваты; 2 – полированные пластины; 3 – образец.

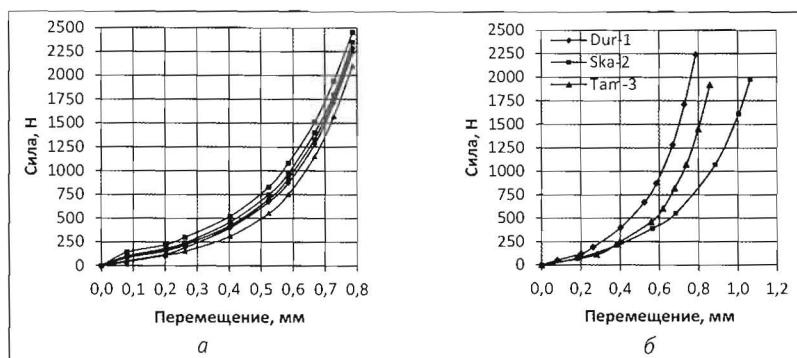


Рис. 5. Экспериментальные данные по сукнам: а – результаты эксперимента по всем образцам сукна Dur-1; б – математическое ожидание зависимостей сила – перемещение изучаемых сукон

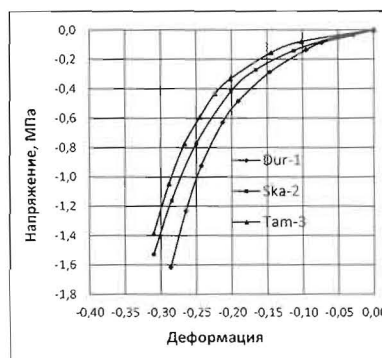


Рис. 6. Зависимость между напряжениями и деформациями при сжатии игло-пробивных прессовых сукон

$$L_{\text{норм}} = \sum_i \left(1 - \frac{\sigma_i^{\text{вычисленное}}}{\sigma_i^{\text{данное}}} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где $\sigma_i^{\text{вычисленное}}$ – рассчитанные величины напряжений в i -й точке в соответствии с законом упругости ($\sigma_i, b_1, b_2 \dots b_m$);

$\sigma_i^{\text{данное}}$ экспериментально определенное напряжение в i -й точке кривой нагружения.

На рис. 7 представлены графики определяющих соотношений Огдена-Хилла для всех сукон с экстраполяци-

ей до относительной деформации 50 %. Результаты подбора упругих постоянных для закона Огдена – Хилла первого порядка, а также ошибка подбора приведены в табл. 2.

Применение полученных данных

В качестве иллюстрации использования сведений о механическом поведении прессовых сукон при по-

перечной деформации сжатия оценим влияние прессового сукна на ширину площадки контакта прессовых валов. На рис. 8 представлены результаты моделирования контактного взаимодействия элементов прессовых частей БКДМ. Контактная задача решена численным методом конечных элементов в пакете Code_Aster.

Графики на рис. 8 показывают, что более толстые и податливые сукна обеспечивают большую ширину площадки контакта. В целом наличие сукна значительно увеличивает ширину площадки

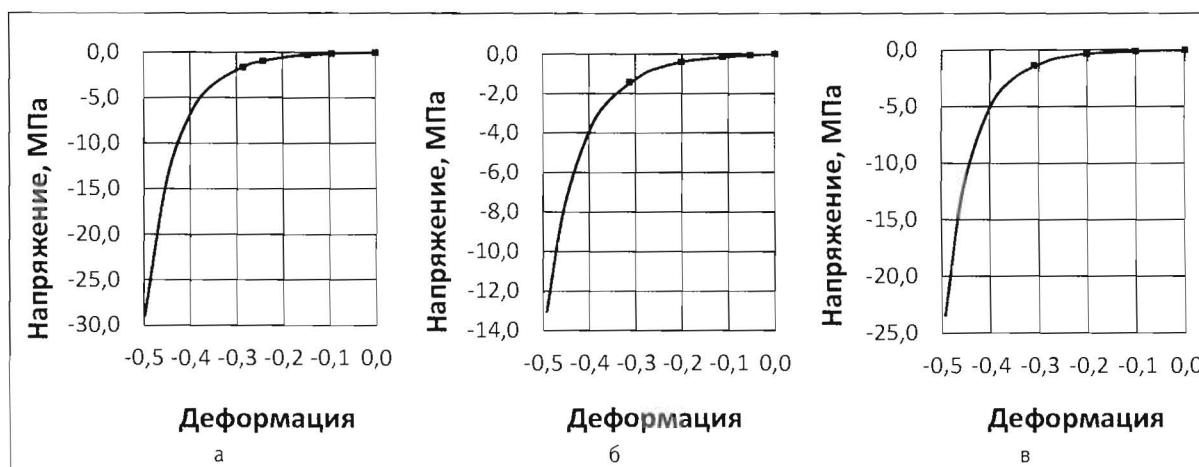


Рис. 7. Кривые деформирования влажных сукон с экстраполяцией закона упругости до деформации 50 %: а – сукно Dur-1; б – сукно Ska-2; в – сукно Tam-3

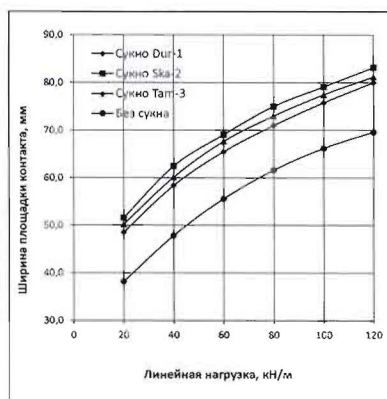


Рис. 8. Влияние сукна на ширину площадки контакта прессовых валов для следующих параметров: твердость покрытия вала 60 П.-Дж., модуль упругости $E_{\text{резина}} = 8$ МПа, диаметр контрвала – 800 мм, диаметр обрезаемого вала – 850 мм, толщина покрытия – 25 мм

контакта прессовых валов, снижает опасность раздавливания бумажного полотна и делает более равномерным распределение контактного давления по ширине площадки контакта.

Выводы

Механическое поведение прессовых иглопробивных сукон при поперечной деформации сжатия является нелинейным. Закон Огдена-Хилла первого порядка является простым соотношением, которое позволяет адекватно описывать большие деформации и нелинейную упругость сукон. Для описания нелинейного поведения прессовых сукон с помощью закона Огдена-Хилла требуется один дополнительный параметр по сравнению с законом Гука. Использование законов механического поведения сукон в численных моделях контактного взаимодействия элемен-

Численные значения упругих параметров прессовых сукон			
Сукно	Dur-1	Ska-2	Tam-3
Параметры	$\mu = -0,117$ МПа $\alpha = -7$ $\beta = 0,05$	$\mu = -0,114$ МПа $\alpha = -6$ $\beta = 0,05$	$\mu = -0,052$ МПа $\alpha = -8$ $\beta = 0,05$
Начальный модуль сдвига G , МПа	0,410	0,342	0,208
Ошибка err , %	4,7	1,1	2,2

тов прессовых частей БКДМ [8] позволит прогнозировать параметры контакта валов в зависимости от конструктивных и технологических характеристик [1] прессовой части, что, в свою очередь, позволит также оптимизировать технологические режимы и выбор одежды для уже существующих машин.

Использование результатов численного моделирования процессов контактного деформирования элементов прессовых частей даст возможность удешевить и сократить сроки проектных и конструкторских изысканий при создании новых бумагоделательных машин.

Система конечноэлементных расчетов Code_Aster является свободно-распространяемым продуктом, используемым в данной работе по лицензии GNU GPL (Универсальная общественная лицензия GNU).

Список литературы

1. Бумагоделательные и картоноделательные машины / науч. ред. В. С. Куров, Н. Н. Кокушин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 347 с.
2. Колычев М. В., Коновалов А. Б. Напряженно-деформированное состояние в зоне контакта жесткого и обрезаемого валов. // Машины, агрегаты и приборы: Бытовое обслуживание и коммунальное хозяйство : тез. докл. II Всеросс. конф., Санкт-Петербург, 17-18 ноября 2006. С. 37-42.
3. Корнюшин К.В., Калугин Ю.К., Бусыгин Ф.М. Метод расчета ширины площадки контакта. // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. науч.тр. Л., 1981. Вып. 9. С. 94-99.
4. Новиков Н.Е. Прессование бумажного полотна. М.: Лесн. пром-сть, 1972. с. 181-183.
5. Adanur S. Papermachine clothing, Asten, CRC Press, 1997, 290 p.
6. Holzapfel G. A. Nonlinear Solid Mechanics: A continuum approach for engineering, Wiley, 2000, P. 227-244.
7. Mathur P.K., Gang V., Arora M.K. Advancement in press felt technology – A paper maker's need. // Indian Pulp and Paper Technical Association J. 2009. Vol.21, No. 4. P. 155-157.
8. Moore R.H., Moschel C.C. A tool for the engineering nip. // Tappi Journal. 1994. Vol. 77. P. 117-122.
9. Ogden R. W. Large deformations isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids. // Proceedings of the Royal Society of London, Series A. 1972. Vol. 326. P. 565-584.
10. Osterberg L. Studies of press felt compression. // Svensk papperstidning. 1978. Nr.10. P. 327.
11. Victory E.L. High speed compression properties of textile structures and sheet-like materials. // J. Applied Polymer Science. 1964. Vol.8. P. 297-306.