

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331.002.5

ФОРМЫ СЕЧЕНИЙ КУСКОВОГО ТОРФА И ЕГО ПРОЧНОСТЬ НА ИЗГИБ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., 2024

В статье указано, что Тверским государственным техническим университетом разработана, запатентована и создана конструкция механического стенда, оснащенного системой цифрового тензометрирования и способного развивать и фиксировать разрушающую нагрузку для испытания на прочность образцов формованной торфяной продукции. Отмечено, что его планомерное использование с целью корректировки и рационализации режимов работы машин для добычи и производства кускового торфа позволит оперативно достигать стабильного качества торфа, однако методика применения данного стенда была сформирована ранее лишь для образцов кусков круглого и прямоугольного сечения. Приведены сведения, разработанные материалы и методика, позволяющие использовать созданный стенд для всех основных форм поперечных сечений кускового торфа, получаемых как в полевых, так и в заводских (стационарных) условиях.

Ключевые слова: кусковой торф, прочность на изгиб, форма поперечного сечения куска, изгибающий момент, момент сопротивления сечения, момент инерции, разрушающая нагрузка.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-4-29-36

ВВЕДЕНИЕ

Добыча в полевых и производство в стационарных условиях кускового торфа (как местного топлива) становится все более актуальной и вполне осуществимой задачей, решение которой может внести значительный вклад в общее направление обеспечения энергетической безопасности населения не только России, но и зарубежных стран [1, 2]. И если ранее были широко распространены лишь куски круглой формы, высотные, омегаобразные и арочные [3], получаемые методами стилки и фрезформовочным с применением соответствующих машин и оборудования, то сейчас количество мундштуков, обеспечивающих различные формы кускового торфа, с опытом производства его и в заводских (стационарных) условиях значительно выросло.

Вместе с тем для оперативного контроля качества [4] и своевременного внесения изменений в режимы работы машин и механизмов с целью исключения потерь [5] необходимо производить оценку прочностных свойств получаемой продукции.

Известные способы оценки относительной механической прочности кускового торфа по крошимости во вращающемся барабане и испытание путем определения давления жидкости, при котором происходит разрушение куска на гидравлическом прессе [3, 6, 7], являются косвенными, недостаточно точными и требующими весьма громоздкого оборудования. Поскольку большинство операций по добыче кускового

торфа после его формования (ворочки, валкования, переукладки валков, уборки) связано с изгибными деформациями куска, испытания на изгиб являются более информативными. В этих целях в ТвГТУ разработана, запатентована и создана конструкция механического стенда для испытания образцов кускового торфа на изгибную прочность. Проведена серия экспериментов по оценке энергоемкости формования торфа [8, 9] и изгибной прочности кусков круглого сечения [10, 11]. Разработана также и методика по оценке прочности на изгиб образцов круглого и прямоугольного сечения. Более того, поскольку в процессе экспериментов выявлена недостаточность предела измерения цифровым тензометрическим оборудованием максимальной (разрушающей) нагрузки (1 кН), создаваемой стендом, разработана также методика по расширению границ измерения нагрузки до 1,5 кН [12]. Однако все это касалось ранее только испытания образцов кускового торфа круглой и прямоугольной форм. Таким образом, цель данной статьи – разработка с помощью созданного стенда универсальной методики оценки прочности кускового торфа на изгиб, распространяемой на все основные существующие виды форм поперечных сечений куска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная, запатентованная и созданная конструкция стенда для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с ручным приводом (рис. 1) подробно описана в работах [10, 11].



Рис. 1. Стенд для испытания на изгибную прочность формованного торфа

Конструкция механического привода с многоступенчатым зубчатым зацеплением и коэффициентом усиления до 500 позволяет обеспечить плавное создание разрушающей нагрузки до 5 кН и провести испытание образцов длиной от 75 до 300 мм, а шириной и высотой от 1 до 130 мм. Исполнение поверхности базирующих установочных опор и конического наконечника в виде поверхностей с

радиусом постоянной кривизны снижает риск скалывания и развития трещин, а следовательно, повышает качество получаемых результатов.

Стенд создает разрушающую нагрузку (рис. 2).

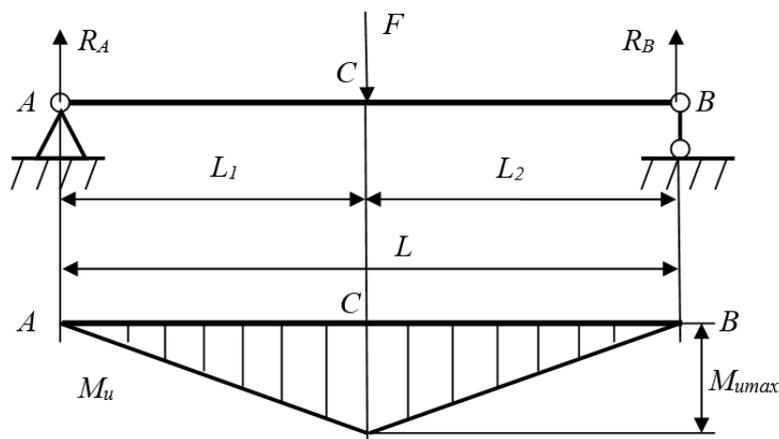


Рис. 2. Силовая схема создания разрушающей нагрузки и эпюра изгибающих моментов

Приложенная в центре испытываемого на изгиб образца нагрузка F (Н) вызывает равные реакции установочных опор при условии, что плечи $L_1 = L_2$ (м):

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} F . \quad (1)$$

Изгибающий момент (Н·м), действующий по всей длине L образца, имеет максимальное значение в точке C (точке приложения нагрузки) и определяется по формуле

$$M_{и\ max} = R_A \frac{L}{2} = \frac{1}{2} F \frac{L}{2} = 0,25FL . \quad (2)$$

Прочность образца на изгиб (Па) в наиболее нагруженной точке может быть определена как отношение максимального изгибающего момента, действующего в сечении, к моменту сопротивления образца изгибу W_x (м^3):

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и\ max}}{W_x} . \quad (3)$$

Зная, что момент сопротивления круглого образца определяется по зависимости

$$W_{x\ \text{кр}} = \frac{\pi D^3}{32} , \quad (4)$$

где D – наружный диаметр образца (м), а момент сопротивления прямоугольного образца – по зависимости [13]

$$W_{x\ \text{пр}} = \frac{bh^2}{6} , \quad (5)$$

где b и h – ширина и высота сечения образца (м) соответственно, можно получить формулы для вычисления изгибающих напряжений $\sigma_{и\ \text{кр}}$ и $\sigma_{и\ \text{пр}}$ для круглых и прямоугольных образцов кускового торфа с учетом уравнений (2) и (3) соответственно:

$$\sigma_{\text{и кр}} = \frac{8FL}{\pi D^3}; \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{и пр}} = \frac{1,5FL}{bh^2} [10, 11]. \quad (7)$$

В формулах (6) и (7) при испытании образцов на изгиб учитываются расстояние между установочными опорами L и параметры сечения кускового торфа или брикета.

Помимо круглого и прямоугольного весьма распространенным является трапецеидальное сечение (так называемые «торфяные кирпичи»), которое часто применяется при выстилке на поля сушки кускового торфа стилочной машиной. При испытании на стенде малое основание a трапеции высотой h может располагаться как снизу, так и сверху. Естественно, при условии создания нагрузки стендом «сверху вниз» на верхнее основание трапеция с большим основанием b , расположенным снизу, имеет больший момент сопротивления, чем трапеция с основанием a , расположенным снизу. Моменты сопротивления таких трапеций определяются по формулам [14]:

для случая, когда большое основание располагается сверху:

$$W_{x \text{ тр}1} = \frac{h^2(a^2+4ab+b^2)}{12(a+2b)}, \quad (8)$$

случая, когда большое основание располагается снизу:

$$W_{x \text{ тр}2} = \frac{h^2(a^2+4ab+b^2)}{12(2a+b)}. \quad (9)$$

Соответственно, при подстановке уравнений (2), (8) и (9) в выражение (3) получаются формулы для определения прочности трапецеидальных кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и тр}1} = \frac{3FL(a+2b)}{h^2(a^2+4ab+b^2)}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{и тр}2} = \frac{3FL(2a+b)}{h^2(a^2+4ab+b^2)}. \quad (11)$$

Следующей (пока еще не широко распространенной, однако весьма перспективной) является трубчатая форма куска. В конце 80-х годов XX столетия Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности был разработан, создан и испытан проект машины для добычи, формования и выстилки кускового торфа трубчатой формы [15]. Данная конструкция не дошла до стадии серийного изготовления из-за известных событий, связанных с рыночной экономикой, хотя именно для них и планировалась. И действительно, суммарная площадь испарения влаги при сушке куска трубчатой формы значительно больше, чем у круглого куска, а следовательно, и процесс полевой сушки идет быстрее, особенно при наличии ветра. Кроме того, разжечь кусок торфа с отверстием внутри проще, чем обычный цилиндрический, а горение в топке котла происходит в более стабильных условиях. На основе данных бесспорных преимуществ продолжились исследования по обоснованию трубчатой формы куска в последующих работах [16–19].

Момент сопротивления куска трубчатой формы (в поперечном сечении – кольца с наружным диаметром D и внутренним диаметром d) определяется по формуле [14]

$$W_{x \text{ труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

При подстановке уравнений (2) и (12) в выражение (3) получается формула для определения прочности трубчатых кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}. \quad (13)$$

Наконец, широко распространенная форма поперечного сечения, особенно для кусков, получаемых в заводских (стационарных) условиях, – квадратно-пустотелая, часто называемая Pini Kay [20]. От формы Pini Kay квадратно-пустотелая форма отличается тем, что не имеет фасок на четырех наружных углах (в сечении брикетов Pini Kay, наиболее часто изготавливаемых из древесных опилок, лежит восьмиугольник). Однако это отличие незначительно, а для прессования торфа в качестве наружного мундштука используется, как правило, квадратная профильная труба. Поскольку в справочной литературе отсутствует готовая формула, позволяющая определить момент сопротивления квадратно-пустотелого сечения, выведем ее. Так, известно, что момент сопротивления относительно центральной оси равен отношению суммарного момента инерции фигуры I_x к расстоянию от оси до наиболее удаленной точки [13]. Момент инерции (m^4) квадрата со стороной a [21]

$$I_{x \text{ кв}} = \frac{a^4}{12}. \quad (14)$$

Момент инерции круга диаметром d [21]

$$I_{x \text{ кр}} = \frac{\pi d^4}{64}. \quad (15)$$

Тогда суммарный момент инерции квадратно-пустотелой фигуры (с учетом, что квадрат полнотелый, а круг образует пустоту):

$$I_x = I_{x \text{ кв}} - I_{x \text{ кр}} = \frac{a^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{192}. \quad (16)$$

Поскольку наибольшее расстояние от оси до самой удаленной точки в квадрате $\frac{a}{2}$, то, согласно определению, момент сопротивления квадратно-пустотелой фигуры

$$W_{x \text{ квп}} = \frac{2I_x}{a} = \frac{2(16a^4 - 3\pi d^4)}{192a} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{96a}. \quad (17)$$

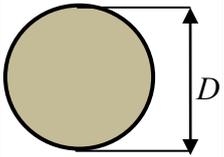
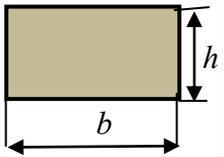
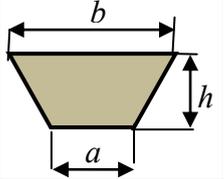
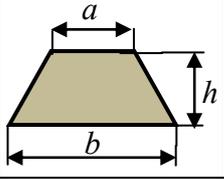
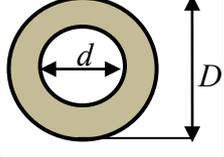
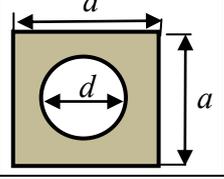
При подстановке уравнений (2) и (17) в выражение (3) получается формула для определения прочности квадратно-пустотелых кусков на изгиб:

$$\sigma_{\text{и квп}} = \frac{24FL}{16a^4 - 3\pi d^4}. \quad (18)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для удобства использования и анализа результаты расчетов сведены в таблицу.

Расчетные зависимости моментов сопротивления W_x и прочности на изгиб $\sigma_{и}$ для торфяных кусков различной формы поперечного сечения*

№ п/п	Наименование формы поперечного сечения куска	Форма поперечного сечения куска	Расчетная зависимость момента сопротивления сечения W_x , м ³	Расчетная зависимость прочности на изгиб $\sigma_{и}$, Па
1	Круглая		$W_{x \text{ кр}} = \frac{\pi D^3}{32}$	$\sigma_{и \text{ кр}} = \frac{8FL}{\pi D^3}$
2	Прямоугольная		$W_{x \text{ пр}} = \frac{bh^2}{6}$	$\sigma_{и \text{ пр}} = \frac{1,5FL}{bh^2}$
3	Трапецидальная 1		$W_{x \text{ тр1}} = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(a + 2b)}$	$\sigma_{и \text{ тр1}} = \frac{3FL(a + 2b)}{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}$
4	Трапецидальная 2		$W_{x \text{ тр2}} = \frac{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}{12(2a + b)}$	$\sigma_{и \text{ тр2}} = \frac{3FL(2a + b)}{h^2(a^2 + 4ab + b^2)}$
5	Трубчатая (кольцевая)		$W_{x \text{ труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]$	$\sigma_{и \text{ труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right]}$
6	Квадратно-пустотелая		$W_{x \text{ квп}} = \frac{16a^4 - 3\pi d^4}{96a}$	$\sigma_{и \text{ квп}} = \frac{24FLa}{16a^4 - 3\pi d^4}$

*Примечание. Предполагается, что разрушающая нагрузка F приложена к изображенным в таблице формам поперечного сечения куска сверху вниз.

Для испытания образцов формованной торфяной продукции на прочность с помощью стенда [10, 11] следует измерить геометрические характеристики сечения испытываемого образца; выставить необходимое расстояние L между установочными опорами; включить цифровой динамометр, дав ему прогреться в течение 10 мин, обнулить показания и перевести в режим фиксации максимального значения разрушающей нагрузки; поместить на установочные опоры стенда испытываемый образец; штурвалом подвести конический наконечник стенда к образцу; медленно вращая штурвал, довести нагрузку до максимального значения, при котором образец

разрушается; занести в журнал наблюдений зафиксированное на цифровом динамометре значение максимальной нагрузки F ; рассчитать по формулам (4), (5), (8), (9), (12) или (17) момент сопротивления сечения образца W_x ; определить по формулам (6), (7), (10), (11), (13) или (18) прочность образца на изгиб $\sigma_{и}$; эксперимент повторить 5...6 раз на однотипных образцах для достижения корректности результатов; определить среднее значение прочности на изгиб по 5...6 измерениям. Полученную в ходе эксперимента среднюю прочность на изгиб необходимо сравнить с допускаемой прочностью, которой можно считать 4...6 МПа при содержании влаги 20...30 % [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы существенно дополнена ранее опубликованная методика по оценке прочности на изгиб формованной торфяной продукции [10, 11], которая включает все имеющиеся на сегодняшний день формы поперечных сечений кускового торфа и позволяет использовать экспресс-метод для оценки прочности образцов на изгиб с помощью разработанного стенда, а также оперативно вносить коррективы в режимы настройки технологического производственного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин [и др.]. М.: Недра. 1982. 760 с.
4. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции. Тверь: Созвездие. 2004. 136 с.
5. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.
6. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат. 1962. 303 с.
7. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра. 1966. 232 с.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1. С. 36–45.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
10. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 52–57.
11. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 47–55.
12. Yablonev A., Guseva A. Method of Expanding Measurement Limits of Digital Dynamometer in Testing Strength of Moulded Peat Products // *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020. V. 174. P. 01035.
13. Степин П.А. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа. 1988. 367 с.

14. Таблица. Изгиб. Осевые моменты инерции сечений (статические моменты сечений), осевые сопротивления и радиусы инерции плоских фигур. URL: <https://dpva.xyz/Guide/GuideMaterials/MaterialsResistant/MomentsOfInertia/> (дата обращения: 14.08.2024).

15. Селеннов В.Г., Петров Ю.О., Юрков В.М. Нереализованные разработки института // *Торф и Бизнес*. 2006. № 3 (5). С. 23–27.

16. Федоров А.С., Казаков Ю.В., Фадеев Д.В. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S9. С. 3–15.

17. Федоров А.С., Михайлов А.В., Гарифуллин Д.Р. Механическая переработка торфяного сырья при формовании в составном мундштуке шнекового пресса // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S44. С. 3–13.

18. Михайлов А.В., Федоров А.С. Анализ условий полевого производства окускованной торфяной продукции. *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы междуна. научно-практ. конф.* СПб.: СПбФ НИЦ МС. 2018. № 1. С. 146–147.

19. Михайлов А.В., Федоров А.С. Направления интенсификации сушки торфяной окускованной продукции в полевых условиях // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2018. № 6. С. 6–8.

20. Ракитова О. Большое дело для малого бизнеса // *The Bioenergy International (Международная биоэнергетика)*. 2011. № 1 (18). С. 14–15.

21. Беликов Г.И. Геометрические характеристики поперечных сечений стержней. Волгоград: ВолгГАСУ. 2015. 57 с.

Для цитирования: Яблонев А.Л. Формы сечений кускового торфа и его прочность на изгиб // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 29–36.

SHAPE OF SECTIONS OF SOD PEAT AND ITS FLEXURAL STRENGTH

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alvovich@mail.ru

The article states that the Tver State Technical University has developed, patented and created the design of a mechanical stand equipped with a digital strain gauging system capable of developing and fixing the breaking load for strength testing of samples of molded peat products. It is noted that its systematic use in order to adjust and rationalize the modes of operation of machines for extraction and production of lump peat will promptly achieve a stable quality of peat, but the methodology of application of this stand was formed earlier only for samples of lumps of round and rectangular cross-section. The information, developed materials and methodology allowing to use the created stand for all main forms of lump peat cross-sections obtained both in the field and in factory (stationary) conditions are given.

Keywords: sod peat, bending strength, cross-sectional shape of the piece, bending moment, sectional moment of resistance, moment of inertia, breaking load.

Поступила в редакцию/received: 28.08.2024; после рецензирования/revised: 10.09.2024;
принята/accepted: 17.09.2024