

УДК 536.241

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-88-94

Термическое сопротивление контактного соединения древесины березы и нагревательного элемента

В. М. Попов^{*,1}, О. Р. Дорняк^{*,1}

** Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г. Ф. Морозова, Воронеж, Россия*

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования термического и механического контакта элементов соединения из разнородных материалов — свежесрубленной древесины лиственной породы (березы) и пластины из сплава Д16Т. Эксперимент проведен на специальной установке, позволяющей с помощью термопар получать профиль температуры в контактных парах в установившемся процессе теплопередачи. Контактная пара подвергнута нагружению сжимающими усилиями, при этом диапазон изменения давления на внешней границе контактной пары составляет от 0.1 до 1.5 МПа. Результаты исследования выявили тенденцию на уменьшение с ростом давления в контактной зоне величины температурного скачка. При этом значение плотности теплового потока увеличивается. Опытные данные аппроксимированы аналитическими зависимостями. Показано, что увеличение давления на древесный образец до 1.5 МПа приводит к снижению термического сопротивления контакта более, чем в 2 раза. Данные эксперимента могут быть использованы при инженерных расчетах режимных параметров процесса кондуктивной сушки и нагрева пиломатериалов из древесины березы.

Ключевые слова

Контактное термическое сопротивление, древесина березы, кондуктивный нагрев

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-08-00165).

Введение

Контактная сушка — один из широко распространенных способов сушки растительного сырья, в том числе, древесины. Современные лесосушильные камеры часто комбинируют тепловое и механическое воздействие на материал, для того чтобы

избежать его коробления [1]. Пресс-вакуумные лесосушильные камеры производятся в России, они имеют производительность выше до 5 раз, чем конвективные сушилки (рисунок 1). Древесина при сушке находится под давлением порядка 0.1 МПа.

¹ Для переписки:

Email: etgvglta@mail.ru, ordornyak@mail.ru



Рисунок 1 — Пресс-вакуумная лесосушильная камера [1].

Проектирование технологических операций, связанных с кондуктивным нагревом или процессом кондуктивной сушки древесины, может осуществляться на основе анализа математических моделей, включающих условия теплового взаимодействия двух разнородных материалов — древесины и сплава, который использован при изготовлении нагревательных поверхностей.

Эти условия записываются с помощью соотношения Ньютона–Рихмана, определяющего линейную зависимость теплового потока на внутренней границе контактной пары от скачка температуры. Коэффициент пропорциональности в этом соотношении равен $1/R_k$, где R_k — контактное термическое сопротивление. Величина термического сопротивления контакта зависит от широкого спектра теплофизических и

геометрических факторов, поэтому определение R_k — достаточно трудная задача, которая в основном решалась на основе экспериментального подхода [2–6]. В последние десятилетия появился также ряд теоретических работ, результаты которых направлены на изучение свойств теплового контакта с использованием методов математического моделирования [7–12]. Однако, как делают вывод авторы [5], наиболее надежным источником информации о значениях контактного термического сопротивления остается физический эксперимент, хотя постановка и проведение эксперимента по изучению контактного теплообмена отличается высокой технической сложностью, а длительность переходного процесса существенно велика [1].

Материалы и методы

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования контактного термического взаимодействия элемента из свежесрубленной древесины лиственной породы (березы) и пластины из сплава Д16Т. Вид и схема лабораторной установки представлена на рисунках 2 и 3. Подготовленные элементы контактной пары имеют высоту 40 мм. Шероховатость поверхности образцов из сплава составила 2.1 мкм, древесины — 3.8 мкм. Температура нагревателя поддерживалась на уровне 120 °С, температура холодильника составляла 20 °С.



Рисунок 2 — Вид экспериментальной установки для определения контактных термосопротивлений

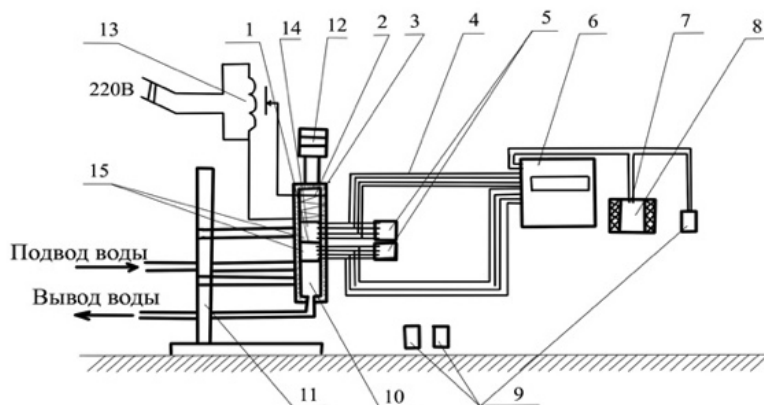


Рисунок 3 — Принципиальная схема экспериментальной установки для определения контактных термосопротивлений: 1 — нагреватель; 2 — нагревательный элемент; 3 — теплоизоляция; 4 — горячий спай; 5 — переключатель позиций; 6 — осциллограф самопишущий; 7 — холодный спай; 8 — сосуд Дьюара; 9 — потенциометры; 10 — холодильник; 11 — штатив; 12 — набор грузов; 13 — реостат; 14 — зона контакта; 15 — контактирующие образцы.

Результаты и их обсуждение

Процесс теплопередачи в рассматриваемых условиях приводит к формированию установившегося распределения температуры по высоте образцов, значения которой регистрируются с помощью термопар. Результаты эксперимента представлены в таблице и на графиках на рисунке 4.

Из приведенных зависимостей в табличной и графической формах (таблица 1 и рисунок 4) следует, что величина скачка температуры ΔT_k на границе контактирующих образцов уменьшается с ростом интенсивности механического нагружения. В рассмотренном диапазоне давлений от 0.1 до 1.5 МПа скачок температуры ΔT_k уменьшается в 1.8 раза. При этом рассчитанное приближенно значение плотности теплового потока через поверхность контакта q_k возрастает, но менее значительно, примерно в 1.3 раза. Расчётные значения термического сопротивления контакта $R_k = \Delta T_k / q_k$ с ростом сжимающих усилий в интервале 0.1÷1.5 МПа уменьшаются более, чем в 2 раза.

Таблица 1 — Зависимость контактного термосопротивления в контактной паре с поверхностями из сплава Д16Т и свежесрезанной древесины мягкой породы (береза) от давления

Давление P , МПа	Температурный перепад на контакте ΔT_k , К	Удельный тепловой поток $q_k \cdot 10^{-3}$, Вт/м ²	Контактное термосопротивление $R_k \cdot 10^4$, м ² К/Вт
0.1	4.7	9.1	0.52
0.25	4.5	9.5	0.47
0.6	4.2	9.6	0.44
1.0	3.9	10.2	0.38
1.2	3.4	10.6	0.32
1.5	2.6	11.7	0.22

Для удобства использования методом наименьших квадратов получены функции, аппроксимирующие полученные экспериментальные данные:

$$\Delta T_k = -1.156p^3 + 1.193p^2 - 1.795p + 4.854; \quad (1)$$

$$q_k = 1.465p^3 - 2.383p^2 + 2.1p + 8.977; \quad (2)$$

$$R_k = -0.1429p^3 + 0.254p^2 - 0.2763p + 0.5452. \quad (3)$$

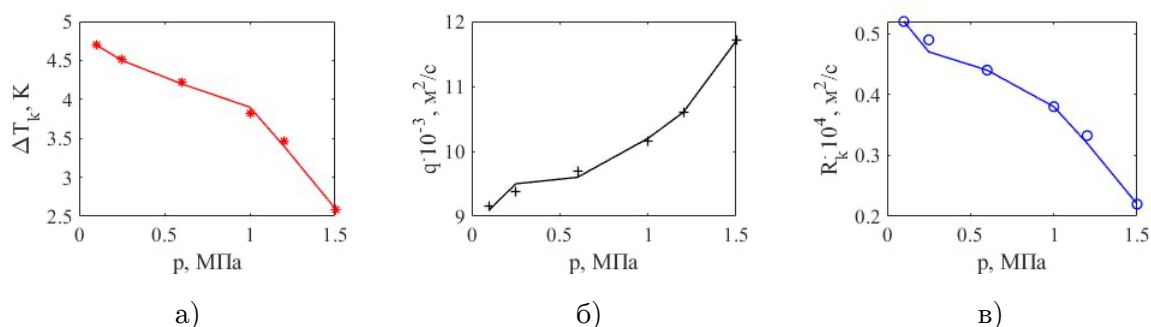


Рисунок 4 — Зависимость температурного скачка от: а) плотности теплового потока; б) термического сопротивления контакта; в) давления на контактную пару древесина-Д16Т. Непрерывные кривые расчет по формулам (1-3), маркеры — данные эксперимента.

Сумма квадратов отклонений расчётных и опытных значений, отнесенная к квадрату максимального значения, составила для величин ΔT_k и q_k менее 0.05%, а для R_k — менее 0.2%.

Закключение

Экспериментально изучены условия термического взаимодействия заготовки из свежесрубленной древесины березы и нагревательного элемента, выполненного из сплава Д16Т при различной интенсивности прижимных усилий.

Результаты исследования указывают на уменьшение величины температурного скачка с ростом интенсивности распределенной нагрузки, приложенной на поверхности контактного соединения из древесного образца и сплава. При этом значение плотности теплового потока на внутренней границе контактной пары увеличивается. Опытные данные аппроксимированы аналитическими зависимостями.

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне давлений от 0.1 до 1.5 МПа величина контактного сопротивления уменьшается от $5.2 \cdot 10^4 \text{ м}^2\text{К/Вт}$ до $2.2 \cdot 10^4 \text{ м}^2\text{К/Вт}$. Увеличение давления на древесный образец до 1.5 МПа приводит к снижению термического сопротивления контакта более, чем в 2 раза.

Данные эксперимента могут быть использованы при проектировании

режимных параметров процесса кондуктивной сушки и нагрева пиломатериалов из древесины березы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Пресс-вакуумные лесосушильные камеры.
<http://drylesvid.ru/equipment/wood-drying-chambers/press-vac/>. Дата обращения 20.05.2022.
- [2]. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. Москва: Энергия, 1971.
- [3]. Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Румянцев С. В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. *Глав. ред. физ.-мат. лит*, М.: Наука, 1988. 288 с.
- [4]. Алифанов О. М., Будник С. А., Ненарокомов А. В., Черепанов В. В. Экспериментально-теоретическое исследование процессов теплообмена в высокопористых материалах. *Тепловые процессы в технике*, 2011, т. 3, № 2, с. 53–65.
- [5]. Алифанов О. М., Черепанов В. В. Идентификация моделей и прогноз физических свойств высокопористых теплозащитных материалов. *Инженерно-физический журнал*, 2010, т. 83, № 4, с. 720–732.

- [6]. Меснянкин С. Ю., Викулов А. Г., Викулов Д. Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел. *Успехи физических наук*, 2009, т. 179, № 9, с. 945–970. DOI: 10.3367/UFNe.0179.200909с.0945.
- [7]. Chumak K. A., Martynyak R. M. Effective Thermal Contact Resistance of Regularly Textured Bodies in the Presence of Intercontact Heat-Conducting Media and the Phenomenon of Thermal Rectification. *Journal of Mathematical Sciences*, 2018., 236(2), p. 160–171. DOI:10.1007/s10958-018-4103-7
- [8]. Дорняк О. Р., Попов В. М., Анашкина Н. А. Математическое моделирование контактного термического сопротивления для упругодеформируемых твердых тел методами механики многофазных систем. *Инженерно-физический журнал*, 2019, т. 92, № 5, с. 2155–2167.
- [9]. Дорняк О. Р., Попов В. М., Анашкина Н. А. Математическое моделирование термического сопротивления в контактных парах из гомогенных и гетерогенных материалов. *Тепловые процессы в технике*, 2019, т. 11, № 1, с. 24–33.
- [10]. Дорняк О. Р., Попов В. М. Математическое моделирование выпрямления теплового потока в контактных парах. *Тепловые процессы в технике*, 2020, т. 12, № 8, с. 364–373. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-364-373
- [11]. Дорняк О. Р., Попов В. М. Условия неидеального теплового контакта при моделировании температурных полей в разъемных соединениях твердых тел. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 11, с. 488–494. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-11-488-494
- [12]. Мурашов М. В., Панин С. Д. Микромеханика материалов: процессы на шероховатых поверхностях. *Тепловые процессы в технике*, 2010, т. 2, № 4, с. 164–168.

Попов Виктор Михайлович — д-р техн. наук, профессор, кафедра электротехники, теплотехники и гидравлики, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8).

Дорняк Ольга Роальдовна — д-р техн. наук, заведующая кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация, 394087, Воронеж, ул. Тимирязева, 8).

Thermal resistance of the contact connection of birch wood and the heating element

V. M. Popov^{*,1}, O. R. Dorniyak^{*,1}

** Voronezh state forestry engineering University
named after G. F. Morozov, Voronezh, Russia*

Abstract

The results of an experimental study of the thermal and mechanical contact of the elements of a compound made of dissimilar materials - freshly cut hardwood (birch) and a plate made of alloy D16T are presented. The experiment was carried out on a special installation that allows using thermocouples to obtain a temperature profile in contact pairs in a steady-state heat transfer process. The contact pair is subjected to compressive forces, while the pressure range at the outer boundary of the contact pair is from 0.1 to 1.5 MPa. The results of the study revealed a tendency to decrease with increasing pressure in the contact zone of the magnitude of the temperature jump. At the same time, the value of the heat flux density increases. Experimental data are approximated by analytical dependencies. It is shown that increasing the pressure on the wood sample to 1.5 MPa leads to a decrease in the thermal resistance of the contact by more than 2 times. The experimental data can be used in engineering calculations of the operating parameters of the process of conductive drying and heating of birch lumber.

Keywords

Contact thermal resistance, birch wood, conductive heating.

REFERENCES

- [1]. Press-vakuumnye lesosushil'nye kamery [Press-vacuum drying chambers]. <http://drylesvid.ru/equipment/wood-drying-chambers/press-vac/>. Accessed 20.05.2022.
- [2]. Popov V. M. Teploobmen v zone kontakta raz'emnyh i neraz'emnyh soedinenij [Heat exchange in the contact zone of detachable and non-removable joints]. Moscow: Jenergiya Publ., 1971. (In Russ.)
- [3]. Alifanov O. M., Artjuhin E. A., Rumjancev S. V. Jekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach i ih prilozheniya k obratnym zadacham teploobmena [Extreme methods for solving ill-posed problems and their applications to inverse heat transfer problems]. Glav. red. fiz.-mat. lit, Moscow: Nauka Publ., 1988, 288 p. (In Russ.)
- [4]. Alifanov O. M., Budnik S. A., Nenarokomov A. V., Cherepanov V. V. Jeksperimental'noteoreticheskoe issledovanie processov teploobmena v vysokoporistyykh materialakh [Experimental and theoretical study of heat transfer processes in highly porous materials]. *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2011, vol. 3, № 2, pp. 53–65. (In Russ.)
- [5]. Alifanov O. M., Cherepanov V. V. Identification of models and prediction of physical properties of highly porous heat-shielding

¹ Corresponding author:

Email: etgvglta@mail.ru, ordorniyak@mail.ru

materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, № 4, pp. 770–782.

[6]. Mesnjankin S. Ju., Vikulov A. G., Vikulov D. G. Sovremennyy vzgljad na problemy teplovogo kontaktirovaniya tverdyh tel. *Uspehi fizicheskikh nauk* [Modern view on the problems of thermal contact of solids]. 2009, vol. 179, № 9, pp. 945–970. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNe.0179.200909c.0945.

[7]. Chumak K. A., Martynyak R. M. Effective Thermal Contact Resistance of Regularly Textured Bodies in the Presence of Intercontact Heat-Conducting Media and the Phenomenon of Thermal Rectification. *Journal of Mathematical Sciences*, 2018, 236(2), pp. 160–171. DOI: 10.1007/s10958-018-4103-7

[8]. Dornjak O. R., Popov V. M., Anashkina N. A. Mathematical modeling of contact thermal resistance for elastostrained solid bodies by the methods of multiphase systems mechanics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2019, vol. 92, № 5, pp. 1117–1129.

[9]. Dornjak O. R., Popov V. M., Anashkina N. A. Matematicheskoe modelirovanie termicheskogo soprotivleniya v kontaktnykh parakh iz gomogennykh i geterogennykh materialov [Mathematical modeling of thermal resistance in

contact pairs made of homogeneous and heterogeneous materials]. *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2019, vol. 11, № 1, pp. 24–33. (In Russ.)

[10]. Dornjak O. R., Popov V. M., Matematicheskoe modelirovanie vyprjamleniya teplovogo potoka v kontaktnykh parakh [Mathematical modeling of heat flow rectification in contact pairs]. *Teplovye processy v tekhnike*, 2020, vol. 12, № 8, pp. 364–373. (In Russ.) DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-364-373

[11]. Dornjak O. R., Popov V. M. Uslovija neideal'nogo teplovogo kontakta pri modelirovanii temperaturnykh polej v raz'emnykh soedinenijah tverdyh tel [Conditions of non-ideal thermal contact when modeling temperature fields in separable joints of solids]. *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2021, vol. 13, № 11, pp. 488–494. (In Russ.) DOI: 10.34759/tpt-2021-13-11-488-494

[12]. Murashov M. V., Panin S. D. Mikromekhanika materialov: processy na sherohovatykh poverhnostjakh [Micromechanics of materials: processes on rough surfaces]. *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal processes in engineering], 2010, vol. 2, № 4, pp. 164–168. (In Russ.)

Popov V. M. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

Dornjak O. R. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Hydraulics, Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov (Rabfakovskaya st., 34, Ivanovo, 153003, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Термическое сопротивление контактного соединения древесины березы и нагревательного элемента / В. М. Попов, О. Р. Дорняк // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 3(5). С. 88 – 94.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-88-94

Please cite this article as:

Popov V. M., Dornjak O. R. Thermal resistance of the contact connection of birch wood and the heating element. *Industrial processes and Technologies*, 2022, vol. 2, no. 3(5), pp. 88 – 94.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-3(5)-88-94