

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 674.812

А. Б. НЕВЗОРОВА, доктор технических наук, В. В. МАКЕЕВ, младший научный сотрудник, В. Б. ВРУБЛЕВСКИЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОПИТКИ АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕССОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложен способ термоконтрастных ванн и определены режимы его применения для увеличения степени наполнения загущенным смазочным материалом древесных вкладышей торцово-прессового деформирования.

Применение древесины в качестве антифрикционного материала возможно после проведения ее модифицирования. Прессование и пропитка смазочным материалом придают ей по сравнению с натуральной древесиной комплекс повышенных физико-механических и антифрикционных свойств.

Одним из наиболее перспективных методов прессования является торцово-прессовое деформирование (ТПД), который позволяет при помощи гибкой дискретной системы сформировать бездефектный древесный вкладыш со степенью прессования по внутренней и наружной поверхностям соответственно  $\epsilon_{вн} = 48 \dots 52 \%$  и  $\epsilon_{н} = 12 \dots 18 \%$  [1].

Для придания древесному вкладышу свойства самосмазываемости его пропитывают смазочным материалом (СМ), модифицированным полимерной присадкой. Научные результаты, изложенные в работах [2–4], послужили основой для дальнейших исследований по поиску путей увеличения степени наполнения капиллярно-сосудистой системы древесных вкладышей ТПД загущенным СМ.

Цель данной работы – исследовать процесс пропитки древесины ТПД для увеличения степени наполнения ее загущенным смазочным материалом. Для этого необходимо решить следующие задачи: 1) теоретически рассчитать возможную степень наполнения вкладышей ТПД; 2) определить количество связанной влаги, десорбированной из клеточных стенок древесины при высокотемпературной пропитке; 3) исследовать микроструктуру древесных заготовок, пропитанных различными способами; 4) исследовать зависимость степени наполнения древесины ТПД в термоконтрастных ваннах от процентного содержания по массе полимерной присадки.

**Методика проведения исследований.** Исследование заполнения капиллярно-сосудистой системы древесины СМ и измерение степени наполнения  $i$  проводилось весовым методом, численным сравнением объема впитанного смазочного мате-

риала с объемом пустот и полостей в капиллярно-сосудистой системе древесины, а также с применением оптической и конфокальной микроскопии.

Для этого использовался микроскоп Olympus LEXT ols 3000, позволяющий получать объемные изображения исследуемых объектов, и металлографический микроскоп. Изменение массы древесных вкладышей при пропитке контролировалось на лабораторных электронных весах ВСТ-600/10. Относительная влажность древесины измерялась весовым методом с точностью до 0,1 %. Температура СМ в пропиточных ваннах контролировалась ртутным термометром ТЛ-2 (ТУ 25-2021.003-88).

Относительная степень наполнения  $i$  определяется как отношение массы поглощенного смазочного материала ( $m_{нап} - m_{исх}$ ) к массе исходного (непропитанного) образца древесины ( $m_{исх}$ ) влажностью  $W = 2-3 \%$  (уровень химически связанной влаги):

$$i = \frac{m_{нап} - m_{исх}}{m_{исх}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $m_{нап}$  – масса пропитанного образца, г.

В процессе высокотемпературной пропитки происходит насыщение капиллярно-сосудистой системы древесины СМ и одновременное удаление из нее связанной влаги. Исходная масса образцов  $m_{исх}$  с учетом удаленной при пропитке влаги рассчитывается по формуле

$$m_{исх} = m_w - m_{H_2O}, \quad (2)$$

где  $m_w$  – масса образца влажностью  $W$  до проведения пропитки, г;  $m_{H_2O}$  – масса влаги в образце влажностью  $W$ , г.

Для проведения исследований были изготовлены из древесины березы заготовки (карточки) длиной  $L = 117$  мм, шириной  $B = 31$  мм и высотой вдоль волокна  $h = 7$  мм без видимых дефектов и пороков. Их относительная влажность составляла  $W = 20 \pm 3 \%$ . Такие заготовки используются при производстве подшипников скольжения самосма-

зываются (ПСС) диаметром  $d = 25$  мм. Они подвергались торцово-прессовому деформированию с помощью гибкой дискретной системы [5] и через конусообразный приемник перепрессовывались в стальные цилиндрические обоймы, массы которых предварительно измерялись. Пропитка древесных заготовок производилась по способу термоконтрастных ванн [6].

Вкладыши, запрессованные в стальные цилиндрические обоймы, погружались в *горячую* ванну ( $t = 130 \pm 5$  °С) со СМ на основе минерального масла с растворенной высокомолекулярной полимерной присадкой, массовая доля которой составляла  $k = 2$  масс %, и выдерживались в ней 40 мин. Предложенная температура и время пропитки в горячей ванне являются оптимальными для древесных вкладышей толщиной  $h = 7$  мм вдоль волокон [6].

Завершающая стадия пропитки и одновременного охлаждения древесных вкладышей проводилась в емкостях со смазочным материалом с различной массовой долей растворенной высокомолекулярной присадки  $k = 0,1 \dots 1$  %. Температура СМ составляла  $t = 20 \pm 5$  °С. Контроль массы образцов производился с интервалом в 10 мин.

Для определения количества влаги, выделяющейся из древесных вкладышей в процессе пропитки в горячей ванне, одновременно исследовались контрольные непропитанные древесные вкладыши ТПД влажностью  $W = 20 \pm 3$  %, которые помещались в термошкаф при температуре  $t = 130 \pm 5$  °С. Контроль массы производился с интервалом 10 мин в течение 60 мин проведения эксперимента.

**Результаты исследований.** Натуральная древесина березы является капиллярно-сосудистым материалом, объем полостей (П) в которой при плотности  $\rho = 0,58$  г/см<sup>3</sup> достигает 60 % от общего объема древесной заготовки. Благодаря этой особенности она способна аккумулировать СМ в процессе пропитки. Результаты исследований авторов [2] свидетельствуют о том, что для придания вкладышам самосмазываемости в процессе эксплуатации СМ должен находиться в объеме древесины в загущенном состоянии. Для увеличения вязкости его модифицируют высокомолекулярными полимерными присадками.

При трении за счет генерируемой в контактной зоне теплоты вязкость СМ снижается, и он выделяется в контактную зону. В случае использования незагущенного минерального масла оно в процессе эксплуатации интенсивно выделяется в зону трения, и его запасы быстро истощаются.

В работах [4, 5] для пропитки древесных вкладышей ТПД применялся способ горячей ванны. СМ нагревался при помощи тепловых электрических нагревателей (ТЭНов). Установлено, что этот способ позволяет достигнуть степени на-

полнения СМ  $i = 11 \dots 13$  %, при этом одновременно снижается содержание связанной влаги в древесине. Ее количество можно определить по представленной на рисунке 1 зависимости влажности древесины от продолжительности сушки контрольных образцов в термошкафу.

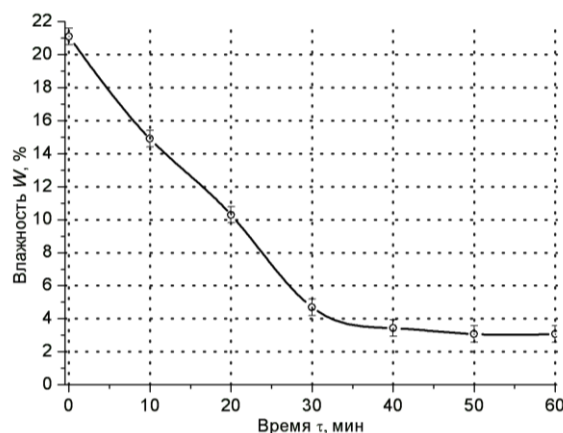


Рисунок 1 – Зависимость влажности древесных заготовок от продолжительности сушки

Анализ зависимости свидетельствует, что влажность древесины снижается до  $W = 3$  % за 40 мин пребывания в термошкафу при  $t = 130 \pm 5$  °С и в дальнейшем существенно не изменяется. Масса древесных вкладышей при этом уменьшается на 8–9 % за счет удаленной связанной влаги, находящейся в клеточной стенке.

При таких же температурно-временных режимах происходит пропитка древесных вкладышей в горячей ванне, что позволяет снизить влажность древесных вкладышей до  $W = 3$  %.

На рисунке 2 представлены микроструктуры торцевой поверхности древесины натуральной (а, б), пропитанной по способу горячей (в, г) и термоконтрастных (д, е) ванн. Полученные трехмерные изображения микроструктур модифицированной древесины методом конфокальной микроскопии, (см. рисунок 2, б, г, е) позволяют оценить качество заполнения капиллярно-сосудистой системы древесины смазочным материалом. Их анализ показывает, что наибольшая глубина проникновения лазерного луча, формирующего изображения поверхностей, составляет  $h = 126 \pm 5$  мкм при сканировании натуральной древесины и  $h = 46 \pm 5$  мкм пропитанной по способу горячей ванны. Ее снижение в 2,5–2,7 раза свидетельствует о том, что капиллярно-сосудистая система древесины была частично заполнена СМ во время высокотемпературной пропитки. Микроструктуры, полученные при помощи оптического микроскопа (см. рисунок 2, а, в, д), не позволяют провести такой количественный анализ, а поэтому являются менее информативными.

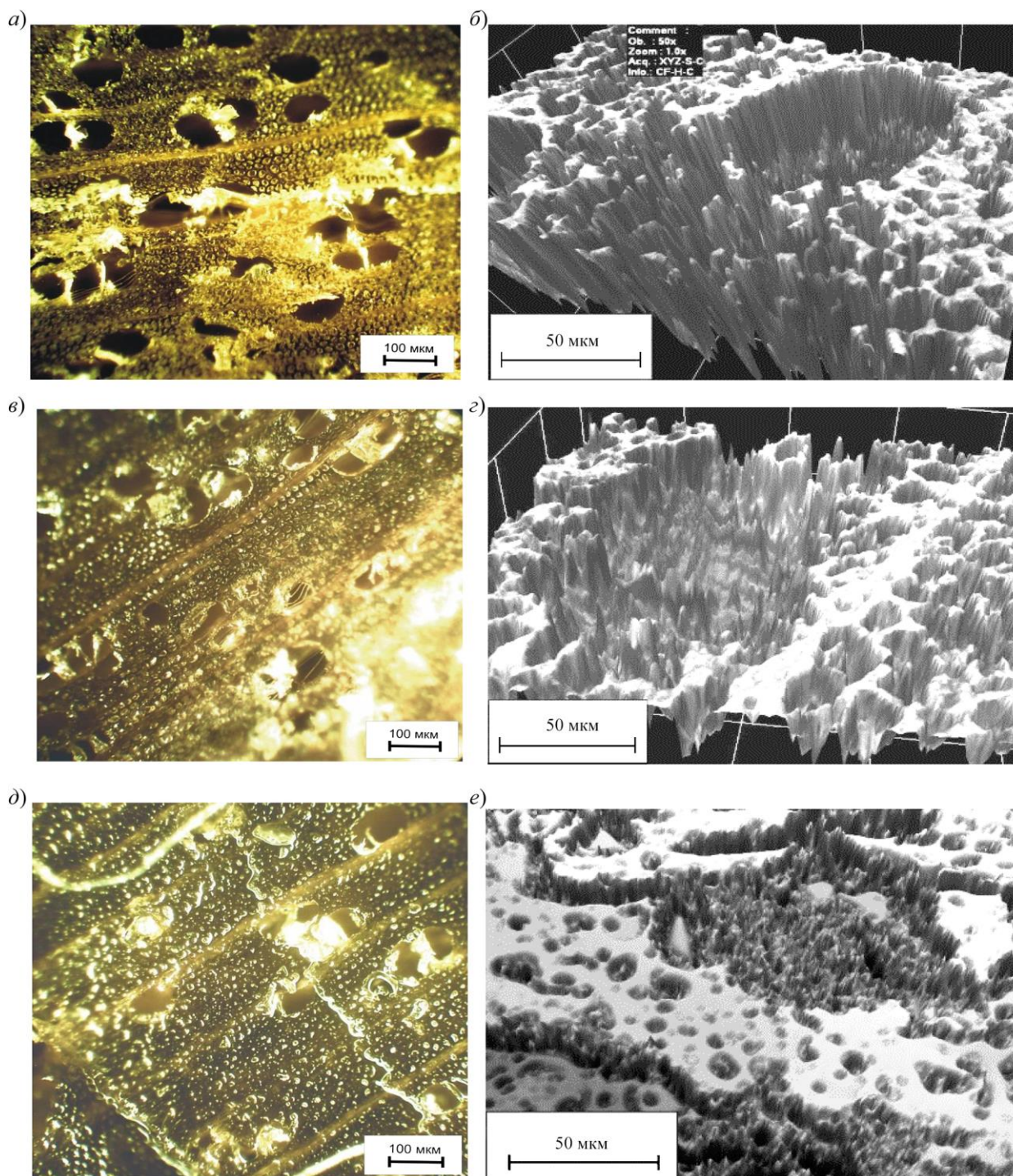


Рисунок 2 – Микроструктуры торцевой поверхности натуральной (а, б), пропитанной по способу горячей ванны (в, г) и пропитанной по способу термоконтрастных ванн (д, е) древесины. Микроструктуры выполнены на микроскопах: а, в, д – оптическом (ув.  $\times 110$ ); б, г, е – конфокальном (ув.  $\times 500$ )

На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований различных способов пропитки предложено использовать способ термоконтрастных ванн для увеличения степени наполнения  $i$  загущенным СМ. Его сущность заключается в следующем: нагретый в горячей ванне древесный вкладыш в стальной цилиндрической обойме помещается в ванну с «холодным» СМ. При охлаждении древесины объем паровоздушной смеси, находящейся в капиллярно-сосудистой системе, уменьшается и образуется вакуум, который и

заполняется СМ. Это способствует увеличению степени наполнения до  $i = 35 \dots 37 \%$  в зависимости от концентрации полимерной присадки в «холодной» ванне (рисунок 3).

Исследование зависимости степени наполнения  $i$  от времени нахождения образцов в холодной ванне, показало, что наиболее интенсивное увеличение  $i$  наблюдается в первые 15–20 мин пропитки в ванне с «холодным» СМ. Дальнейшее увеличение времени пропитки не приводит к возрастанию степени наполнения (см. рисунок 3).

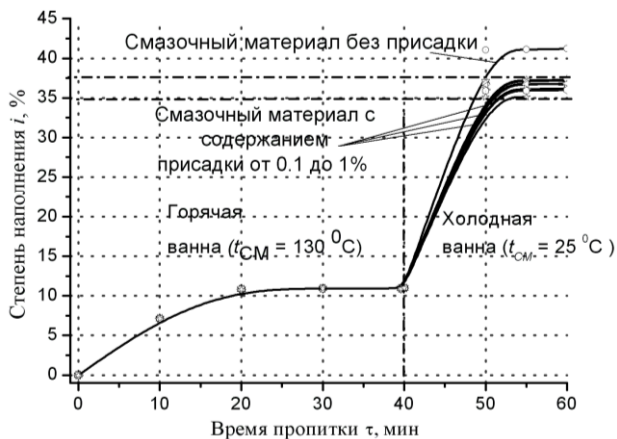


Рисунок 3 – Зависимость степени наполнения древесных вкладышей ТПД от времени пропитки

Полученные результаты подтверждаются данными конфокальной микроскопии древесины, пропитанной по способу термоконтрастных ванн (см. рисунок 2, е). Они показывают, что сосуды и капилляры достаточно равномерно заполнены СМ. Глубина проникновения лазерного луча составила  $h = 25 \pm 5$  мкм, т. е. снизилась в 5 раз по сравнению с натуральной древесиной.

Микроструктуры внутренней и наружной поверхностей, степени прессования которых составляют соответственно  $\epsilon_{вн} = 55$  % (рисунок 4, б, г, е) и  $\epsilon_{н} = 18$  % (рисунок 4, а, в, е), свидетельствуют о том, что последняя обладает значительно большим количеством открытых непрессованных капилляров, через которые СМ поступает в объем древесины во время высокотемпературной пропитки по способу термоконтрастных ванн.

Микроструктуры внутренней поверхности вкладыша (рисунок 4, б, г, е) свидетельствуют о том, что, несмотря на высокую степень прессования  $\epsilon_{вн} = 55$  %, имеется значительное количество капилляров, через которые смазка поступает в зону трения, обеспечивая самосмазываемость подшипника. На рисунке 4, г видно, что капилляры распространяются прямолинейно в глубь древесного вкладыша на 30–40 мкм. Для удобства рассмотрения плотности расположения капилляров микроструктуры были развернуты на  $180^\circ$ , где они имеют вид «пиков» (см. рисунок 4, д, е).

Определение степени наполнения  $i$  смазочным материалом с учетом первоначальной влажности до пропитки основано на разработанной расчетной методике. Она позволила рассчитать объем полостей в древесном вкладыше ТПД, максимальную степень его наполнения СМ, численно сравнить различные способы пропитки. Для упрощения применения разработанной методики создана компьютерная программа «Soak» (с англ. «пропитка»). В качестве исходных данных приняты длина  $L$ , ширина  $B$ , толщина  $h$  и плотность древесной заготовки, а также плотность смазочного материала  $\rho_{см}$ .

**Пример расчета.** Объем древесной заготовки длиной  $L = 11,72$  см, шириной  $B = 3,1$  см и толщи-

ной  $h = 0,7$  см при влажности  $W = 20$  %

$$V_{др} = LBh = 11,72 \cdot 3,1 \cdot 0,7 = 25,4 \text{ см}^3.$$

После ТПД и перепрессовки через первый конический приемник древесная заготовка принимает форму полого цилиндра (рисунок 5).

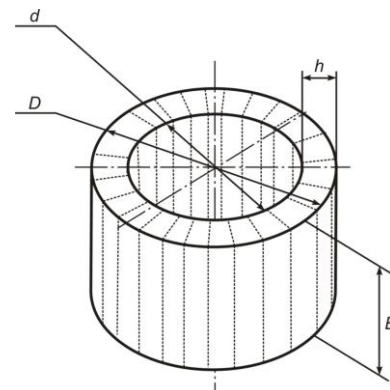


Рисунок 5 – Форма древесного вкладыша после ТПД и перепрессовки через первый конический приемник

Степень прессования по внутренней и наружной поверхности равна соответственно  $\epsilon_{вн} = 54$  % и  $\epsilon_{н} = 15$  %, а диаметры –  $D = 3,1$  см,  $d = 1,7$  см.

Ширина  $B$  и толщина  $h$  древесного вкладыша остается неизменной. Тогда объем древесного вкладыша

$$V_{вк} = \frac{\pi D^2 B}{4} - \frac{\pi d^2 B}{4} = \frac{\pi B}{4} (D^2 - d^2) = \frac{3,14 \cdot 30}{4} (3,1^2 - 1,7^2) = 15,8 \text{ см}^3.$$

В результате ТПД и перепрессовки через первый конический приемник объем древесной заготовки уменьшился в 1,6 раза, исходя из соотношения  $V_{др}/V_{вк}$ .

Изменение объема древесной заготовки происходит за счет уменьшения объема полостей сосудов и капилляров древесины вследствие их деформирования. Если объем полостей в натуральной (непрессованной) древесине березы  $\Pi = 60$  %, тогда во вкладыше ТПД их объем

$$\Pi_{тпд} = \frac{\Pi}{1,6} = \frac{60}{1,6} = 37,5 \text{ \%}.$$

При пропитке древесный вкладыш вследствие удаления из клеточной стенки связанной влаги усыхает по длине на 1,47 %, по ширине – на 1,11 %, толщина древесного вкладыша не изменяется.

Тогда длина древесной заготовки при влажности  $W = 2 \dots 3$  %

$$L_0 = L - \frac{1,47L}{100} = 117,2 - \frac{1,47 \cdot 11,7}{100} = 11,5 \text{ см},$$

$$\text{ширина } B_0 = B - \frac{B \cdot 1,11}{100} = 31 - \frac{3,1 \cdot 1,11}{100} = 3,06 \text{ см}.$$

Объем древесной заготовки при влажности  $W = 2 \dots 3$  %

$$V_{др W=2-3\%} = L_0 B_0 h = 11,5 \cdot 3,06 \cdot 7 = 24,7 \text{ см}^3.$$

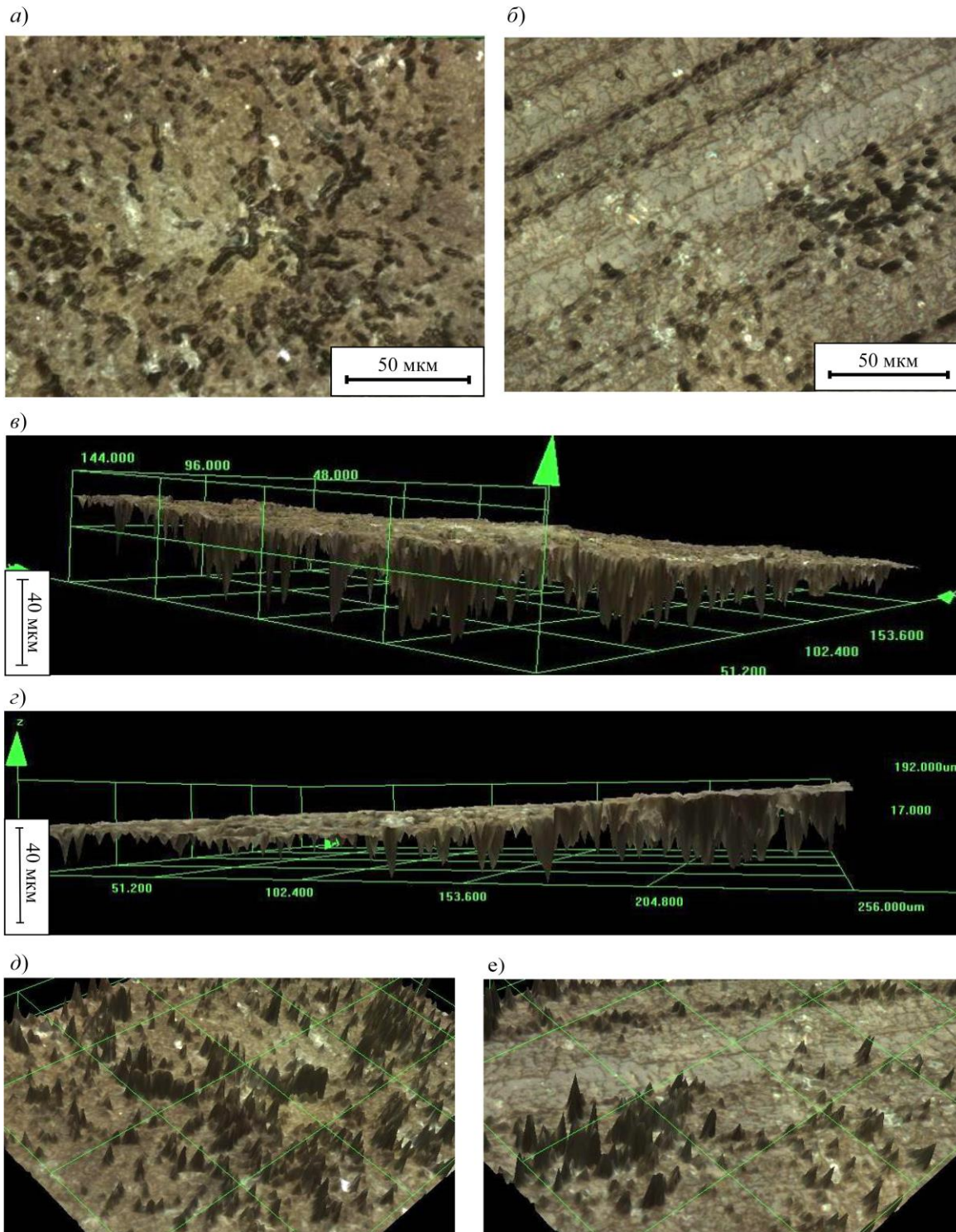


Рисунок 4 – Микроструктуры торцовых поверхностей вкладыша по наружному (а, в, д) и внутреннему (б, з, е) диаметрам (степень прессования наружной поверхности  $\epsilon_n = 18\%$ , внутренней –  $\epsilon_{вн} = 55\%$ ): а, б – вид сверху; в, з – вид сбоку; д, е – вид микроструктур а, б, перевернутых на  $180^\circ$ . Ув.  $\times 500$

Объем полостей в заготовке

$$V_{\text{др.пол}} = \frac{V_{\text{др } W=2-3\%}}{60} \cdot 100 = \frac{24,7 \cdot 100}{60} = 14,8 \text{ см}^3.$$

Объем полостей в древесном вкладыше ТПД, занимающих  $\Pi = 37,5\%$ ,

$$V_{\text{вк.пол}} = \frac{V_{\text{др } W=2-3\%}}{37,5} \cdot 100 = \frac{24,7 \cdot 100}{37,5} = 9,3 \text{ см}^3.$$

Объем СМ после пропитки по способу термо-контрастных ванн рассчитывается исходя из массы и плотности СМ, а масса – в соответствии с формулой по полученным экспериментальным данным:

$$\begin{aligned} m_{\text{см}} &= m_{\text{нап}} - (m_W - m_{\text{H}_2\text{O}}) = \\ &= 18,44 - (16,20 - 2,69) = 4,93 \text{ г.} \end{aligned}$$

На основании полученных результатов вычисляем объем СМ в капиллярно-сосудистой системе древесины при его плотности  $\rho_{\text{см}} = 870 \text{ кг/м}^3$ :

$$V_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}} = \frac{1,65}{0,87} = 1,9 \text{ см}^3 \text{ – после горячей ванны;}$$

$$V_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{\rho_{\text{см}}} = \frac{4,93}{0,87} = 5,7 \text{ см}^3 \text{ – после термоконтрастных ванн.}$$

Рассчитанная теоретически максимальная масса СМ  $m_{\text{см}}^*$  определяется при условии полного заполнения объема капиллярно-сосудистой системы древесного вкладыша ТПД  $V_{\text{вк.пол}}$ :

$$m_{\text{см}}^* = V_{\text{вк.пол}} \rho_{\text{см}} = 9,3 \cdot 0,87 = 8,09 \text{ г.}$$

В этом случае максимальная степень наполнения  $i^*$  СМ древесных вкладышей ТПД рассчитывается по формуле (1):

$$i^* = \frac{m_{\text{нап}} - m_{\text{исх}}}{m_{\text{исх}}} \cdot 100 \% = \frac{m_{\text{см}}^*}{m_{\text{исх}}} \cdot 100 \% = \\ = \frac{8,09}{13,51} \cdot 100 \% = 60 \%.$$

Степень наполнения  $i$  рассчитывается по формуле (1) по экспериментально полученным данным:

– при применении способа горячей ванны

$$i = \frac{m_{\text{нап}} - m_{\text{исх}}}{m_{\text{исх}}} = \frac{15,16 - 13,51}{13,51} \cdot 100 \% = 12 \% ;$$

– при применении способа термоконтрастных ванн

$$i = \frac{m_{\text{нап}} - m_{\text{исх}}}{m_{\text{исх}}} = \frac{18,46 - 13,51}{13,51} \cdot 100 \% = 36,5 \% .$$

Численное сравнение объема впитанного СМ с объемом незаполненных пустот и полостей в капиллярно-сосудистой системе древесного вкладыша ТПД, пропитанного различными способами, определяется по коэффициенту заполнения объема полостей:

$$g = \frac{V_{\text{см}}}{V_{\text{вк.пол}}} \cdot 100 \% , \quad (3)$$

где  $V_{\text{см}}$  – объем поглощенного СМ,  $\text{см}^3$ ;  $V_{\text{вк.пол}}$  – объем полостей в древесном вкладыше ТПД,  $\text{см}^3$ .

После горячей ванны  $g = 20 \%$ , после термоконтрастных ванн  $g = 61 \%$ .

Получено 28.09.2009

**A. B. Nevzorova, V. V. Makeyev, V. B. Vrublevsky.** Research of impregnation antifrictional material on the basis of compressed wood.

There was offered the method of thermocontrast baths, which allows to increase the level of dense lubricant filling of compressed wood. There were also determined the using modes of thermocontrast baths. The scientific results were based on theoretical and experimental researches.

Расчеты, выполненные для древесины ТПД, показывают, что СМ занимает от 18 до 20 % объема полостей капиллярно-сосудистой системы древесного вкладыша при использовании способа горячей ванны и 60–65 % – при применении термоконтрастных ванн, т. е. наполнение древесного вкладыша СМ увеличивается в 3–3,5 раза.

#### Выводы:

1 Установлено, что максимальная степень наполнения древесных вкладышей ТПД, имеющих степень прессования по наружной поверхности  $\epsilon_n = 15 \dots 18 \%$  и по внутренней  $\epsilon_{\text{вн}} = 55 \%$ , составляет  $i^* = 60 \%$ .

2 Пропитка СМ древесных вкладышей ТПД в горячих ваннах обеспечивает степень наполнения  $i = 12 \dots 15 \%$ .

3 Исследованиями микроструктуры поверхностей натуральной древесины и пропитанной различными способами доказано, что насыщение капиллярно-сосудистой системы реализуется наиболее полно при использовании способа термоконтрастных ванн.

4 Применение способа термоконтрастных ванн позволяет увеличить степень наполнения загущенным СМ древесных вкладышей ТПД в 3 раза и достигнуть значения  $i = 35 \dots 37 \%$ .

#### Список литературы

1 **Врублевский, В. Б.** Исследование процесса торцово-прессового деформирования древесины и создание высокопроизводительного оборудования для изготовления подшипников скольжения : дис ... канд. техн. наук : 05.21.05 / В. Б. Врублевский. – Мн., 2001. – 135 с.

2 **Врублевская, В. И.** Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них / В. И. Врублевская, А. Б. Невзорова, В. Б. Врублевский. – Гомель, 2000. – 324 с.

3 **Ломакин, А. Д.** Защита древесины и древесных материалов / А. Д. Ломакин. – М. : Лесная промышленность, 1990. – 256 с.

4 **Моисеенко, В. Л.** Создание самоустанавливающихся подшипников скольжения на основе прессованной древесины и технологии их изготовления : дис ... канд. техн. наук : 05.21.05 / В. Л. Моисеенко. – Мн., 2002. – 120 с.

5 **Невзорова, А. Б.** Теоретические и технологические основы изготовления подшипников скольжения из древесины нормализованной влажности методом объемного деформирования : дис ... докт. техн. наук : 05.21.05, 05.02.08 / А. Б. Невзорова. – Мн., 2003. – 271 с.

6 **Врублевская, В. И.** Совершенствование процесса пропитки древесины торцово-прессового деформирования при производстве подшипников скольжения самосмазывающихся / В. И. Врублевская, В. В. Макеев, А. Б. Невзорова // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2007. – № 2. – С. 52–55.