

Научная статья

УДК 674.8:674.049.2:542.973

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-5-143-156

## Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты

Ю.Г. Скурыдин<sup>1</sup>✉, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

Е.М. Скурыдина<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет, просп. Ленина, д. 61, г. Барнаул, Россия, 656049; skur@rambler.ru✉

<sup>2</sup>Алтайский государственный педагогический университет, ул. Молодежная, д. 55, г. Барнаул, Россия, 656031; skudem@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.10.21 / Одобрена после рецензирования 12.01.22 / Принята к печати 13.01.22

**Аннотация.** Результаты работы направлены на формирование представлений об особенностях молекулярной подвижности компонентов наружных и внутренних слоев материала древесностружечной плиты в диапазоне температур от комнатной до 275...300 °С, а также на выявление факта недоотверждения связующего во внутренних слоях. Приведены данные о температурных зависимостях динамического модуля сдвига наружных и внутренних слоев материала древесностружечной плиты, полученные методом динамического механического анализа на крутильном маятнике. Обнаружены значительные отличия в характере зависимостей для образцов, взятых на разном удалении от поверхностных слоев. Для материала наружных слоев характерна типичная тенденция непрерывного неравномерно-последовательного уменьшения динамического модуля сдвига с ростом температуры, свойственная большинству полимерных и композитных материалов. Во внутренних слоях при температуре 140±5 °С выявлено кратковременное скачкообразное увеличение динамического модуля сдвига относительно соседних участков, не характерное для материалов, находящихся в стабильном состоянии. Кроме того, имеет место тенденция уменьшения динамического модуля сдвига материала древесностружечной плиты при комнатной температуре с удалением от наружных слоев, обусловленная неоднородным фракционным составом и различиями в характере процессов химической сшивки при горячем прессовании. Высказано предположение, что обнаруженное аномальное увеличение динамического модуля сдвига во внутренних слоях материала при температуре 140±5 °С является признаком протекания процесса доотверждения связующего непосредственно в условиях его нагрева при измерении динамического модуля сдвига методом динамического механического анализа. Сделан вывод, для образца древесностружечной плиты характерно максимальное отверждение термореактивного связующего в слоях, отстоящих от обеих поверхностей до 4,5...5,0 мм. Во внутренних слоях, отстоящих от поверхностей на расстояние более 5,5 мм, происходит частичное недоотверждение связующего. Таким образом, показано, что метод динамического механического анализа может быть использован в качестве инструментального средства контроля за наличием во внутренних слоях материала древесностружечной плиты компонентов термореактивного связующего, недоотвержденных в процессе горячего прессования, что поможет получить материал с более стабильными характеристиками.

© Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М., 2022

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

**Ключевые слова:** древесностружечная плита, динамический механический анализ, динамический модуль сдвига, древесина, термореактивная смола, отверждение связующего, композитный материал

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках реализации Программы поддержки научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», проект «Применение методов цифровой обработки для интерпретации экспериментальных данных о структуре и свойствах древесины и древесных композитных материалов».

**Для цитирования:** Скурыдин Ю.Г., Скурыдина Е.М. Послойный динамический модуль сдвига в поперечном сечении древесностружечной плиты // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 5. С. 143–156. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-143-156>

Original article

## Layer-by-Layer Dynamic Shear Modulus in the Cross-Section of a Particle Board

**Yuri G. Skurydin**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAE-1212-2019](https://orcid.org/0000-0002-1852-2152), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1852-2152>

**Elena M. Skurydina**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAB-4572-2021](https://orcid.org/0000-0002-1707-8846), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-8846>

<sup>1</sup>Altai State University, prosp. Lenina, 61, Barnaul, 656049, Russian Federation; [skur@rambler.ru](mailto:skur@rambler.ru)

<sup>2</sup>Altai State Pedagogical University, ul. Molodezhnaya, 55, Barnaul, 656031, Russian Federation; [skudem@rambler.ru](mailto:skudem@rambler.ru)

Received on October 14, 2021 / Approved after reviewing on January 12, 2022 / Accepted on January 13, 2022

**Abstract.** The research results are aimed at the formation of ideas concerning the features of molecular motion of the components of the outer and inner layers of the particle board material in the temperature range from room temperature to 275–300 °C, as well as at revealing the fact of binder undercuring in the inner layers. The paper provides data on the temperature dependences of the dynamic shear modulus of the outer and inner layers of the particle board material, obtained by dynamic mechanical analysis using a torsion pendulum. We found significant differences in the nature of the dependencies for samples taken at different distances from the surface layers. The material of the outer layers is characterized by the typical pattern of a continuous irregularly consistent decrease in the dynamic shear modulus with increasing temperature, which is common to most polymeric and composite materials. A short-term intermittent increase in the dynamic shear modulus relative to neighboring areas was detected in the inner layers at 140±5 °C, which is not typical for materials in a stable state. There is also a tendency for the dynamic shear modulus of the particle board material to decrease at room temperature with distance from the outer layers, due to the heterogeneous fractional composition and differences in the nature of chemical cross-linking during hot pressing. It has been assumed that the detected anomalous increase in the dynamic shear modulus in the inner layers of the material at 140±5 °C is a symptom of the binder post-treatment process directly in conditions of its heating when measuring the dynamic shear modulus by dynamic mechanical analysis. Thus, it is concluded that the particle board sample shows maximum curing of the thermosetting binder in the layers, which are 4.5–5.0 mm distant from both



surfaces. Partial undercuring of the binder occurs in the inner layers, which are more than 5.5 mm away from the surfaces. Thus, it is shown that the method of dynamic mechanical analysis can be used as a tool to control the presence in the inner layers of the particle board material of the components of thermosetting binder, undercured in the hot pressing process, which will help to obtain a material with more stable characteristics.

**Keywords:** particle board, dynamic mechanical analysis, dynamic shear modulus, wood, thermosetting resin, binder curing, composite material

**Acknowledgments:** The research was carried out within the framework of the Support Program for scientific and pedagogical workers of the Altai State University, the project “Application of Digital Processing Methods for Interpretation of Experimental Data on the Structure and Properties of Wood and Wood Composite Materials”.

**For citation:** Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Layer-by-Layer Dynamic Shear Modulus in the Cross-Section of a Particle Board. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 5, pp. 143–156. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-5-143-156>

### *Введение*

До настоящего времени древесина остается одним из важнейших природных материалов, используемых человеком. В число направлений ее применения входит получение конструкционных композитных материалов – древесностружечных плит (ДСТП), в составе которых древесина в предварительно измельченном виде присутствует в качестве наполнителя [4, 6, 10, 17–19, 23]. Технологические процессы в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности требуют постоянного контроля качества выпускаемой продукции, соответствия производственных параметров условиям технологических регламентов и стандартов (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013) [2]. Важным этапом контроля является определение механических характеристик материалов, для чего разработаны и применяются множество методик [3]. При этом до настоящего времени использование традиционных методов контроля физико-механических характеристик древесных композитных материалов не всегда позволяет с достаточной степенью достоверности выявить влияние производственных параметров на характер процессов, протекающих при изготовлении материала.

Например, может быть затруднена оценка влияния параметров режимов горячего прессования: температуры, давления, количества и марки используемого связующего, химических и механических добавок и т. п. – на свойства материала и характер межмолекулярного взаимодействия образующих его компонентов. Зачастую применяемые для этого методы являются сложными, требуют использования уникального дорогостоящего лабораторного оборудования, функциональность которого для лабораторий специализированных предприятий зачастую избыточна.

ДСТП представляет собой неоднородный по составу и свойствам композитный материал, образованный измельченным древесным наполнителем и синтетическим связующим. При горячем прессовании древесно-клеевой композиции происходит термическое отверждение связующего, образующего прочную матрицу, обволакивающую древесные частицы и придающую мате-

риалу механическую прочность. Структура внутренних слоев ДСтП отличается от структуры слоев, образующих ее поверхность, что обусловлено требованиями к внешнему виду и качественным характеристикам материала (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013) [2]. Следствием являются значительные различия в механических свойствах слоев ДСтП, в отношении образующих их компонентов, в характере термореактивных процессов, протекающих в плите при прессовании [2, 7]. При этом могут иметь место различия в степени отверждения связующего в материале в зависимости от расположения слоя относительно поверхности плиты. Актуальной является задача поиска методов выявления и анализа таких отличий – в том числе для оптимизации параметров производственного процесса с точки зрения получения материала с требуемыми физико-механическими свойствами при сведении к минимуму затрат на его получение.

Цель исследования – изучение особенностей молекулярной подвижности компонентов наружных и внутренних слоев ДСтП методом динамического механического анализа (ДМА), выявление недоотвержденности связующего во внутренних слоях.

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве объекта исследования выбран материал наружных и внутренних слоев ДСтП толщиной 16 мм. ДСтП получена по стандартной технологии (при удельном давлении 1,8...2,2 МПа, температуре 150...180 °С и продолжительности склеивания 3...3,5 мин) на основе технологической щепы древесины хвойных и лиственных пород (ГОСТ 10632–2014, ГОСТ 32274–2013, ГОСТ 32399–2013). В качестве связующего материала использована карбамидоформальдегидная смола марки КФ-МТ. Образцы для исследований изготовлены в виде пластин прямоугольного сечения размером ~ 80×10×1,5...2 мм. Вырезка образцов выполнена из поверхностных и внутренних слоев плиты в соответствии со схемой, показанной на рис. 1. В табл. 1 сопоставлены индексы (А, В, С, D, E, F) каждого из образцов с местом его исходного расположения в ДСтП, расстоянием друг от друга и от наружной поверхности ДСтП.

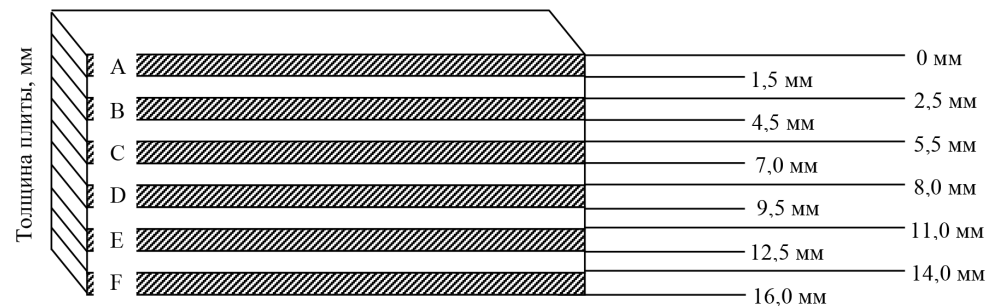


Рис. 1. Схема распределения образцов (А, В, С, D, E, F) по толщине ДСтП

Fig. 1. Schematic distribution of samples (A, B, C, D, E, F) by thickness of particle boards

Таблица 1

**Сопоставление толщины образцов с исходным местом их расположения относительно одной из наружных плоскостей ДСтП**

**Comparison of the thickness of the samples with their original position relative to one of the outer planes of the particle board**

Образец	Диапазон распределения толщины образца в зависимости от удаленности относительно наружной плоскости плиты, мм	Расстояние от срединной части образца до наружной плоскости плиты, мм
A	0,0...1,5	0,75
B	2,5...4,5	3,50
C	5,5...7,0	6,25
D	8,0...9,5	8,75
E	11,0...12,5	11,75
F	14,0...16,0	15,00

Предметом исследования стали температурные зависимости динамического модуля сдвига  $G'$  образцов ДСтП. Эти зависимости позволяют определить наличие областей температурных переходов, соответствующих резкому изменению характера молекулярной подвижности в тех или иных компонентах материала [13, 22]. Для ДСтП такими компонентами являются лигнин, целлюлоза и гемицеллюлозы древесины, карбамидоформальдегидная смола. Наличие переходных областей может быть обусловлено протекающими в них релаксационными процессами, вызванными размораживанием сегментальной подвижности молекулярных макроцепей (процессы расстекловывания), переходами из одного фазового состояния в другое. Положение переходных областей, их ширина и интенсивность, взаимное расположение зависят от структуры макромолекул, от присутствия в композитном материале примесей, от особенностей межфазного взаимодействия и т. п. [13, 16, 22].

Измерение  $G'$  выполнено методом ДМА на обратном крутильном маятнике [9] в соответствии с ГОСТ 20812–83. Возможность применения ДМА для изучения особенностей молекулярной подвижности компонентов древесины и композитных материалов, полученных на ее основе, ранее была показана в серии экспериментов [15, 21]. Диапазон температур, использованных в работе, – от комнатной до 275...300 °С, шаг измерений – 5...10 °С. В каждой точке измерений проведено предварительное термостатирование продолжительностью не менее 10 мин, необходимое для равномерного прогрева всего объема исследуемого образца до заданной температуры измерений. Результатом измерений является дискретно-точечная температурная зависимость  $G'$  в заданном диапазоне.

Для повышения точности определения температурных границ и температуры максимума интенсивности переходных областей выполнена цифровая обработка экспериментальных данных. Для этого произведено сглаживание экспериментальных зависимостей  $G'(t)$  кубическими сплайнами, в результате которого зависимость приобретает вид непрерывной неравномерно-убывающей плавной кривой, определяющей значения  $G'$  во всем исследованном диа-

пазоне (рис. 2). Далее определены первая и вторая температурные производные  $G'$ , характерный вид которых (рис. 2) позволяет найти точные границы и температуру максимума интенсивности любой из переходных областей. Максимуму интенсивности того или иного переходного процесса соответствует минимум на температурной зависимости  $dG'/dt$  и переход через ноль кривой температурной зависимости  $d^2G'/dt^2$ . Началу переходного процесса соответствует минимум зависимости  $d^2G'/dt^2$ , а его завершению – соседний максимум  $d^2G'/dt^2$ , расположенный правее.

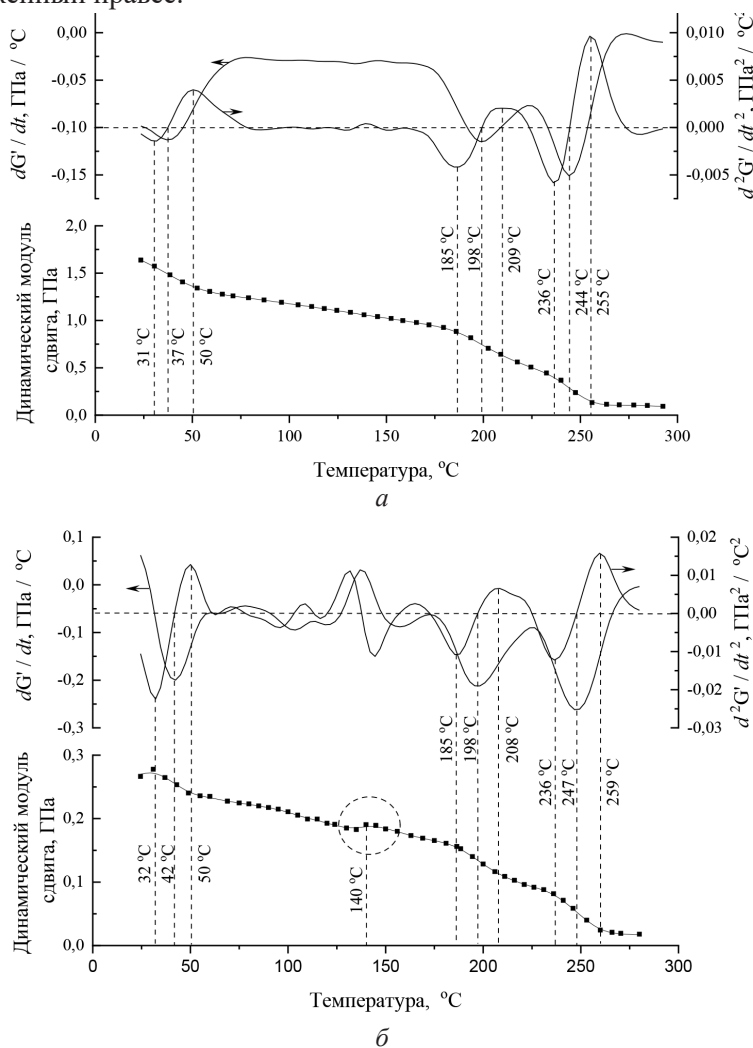


Рис. 2 (начало). Температурные зависимости динамического модуля сдвига  $G'$ , первой и второй температурных производных  $G'$  для:  $a$  – наружного слоя ДСтП (образец А);  $b$  – внутреннего слоя ДСтП (образец D);  $b$  – внутреннего слоя ДСтП (образец E);  $z$  – наружного слоя ДСтП (образец F)

Fig. 2 (beginning). Temperature dependences of the dynamic shear modulus  $G'$ , first and second temperature derivatives  $G'$ :  $a$  – of the outer layer of the particle board (sample A);  $b$  – of the inner layer of the particle board (sample D);  $b$  – of the inner layer of the particle board (sample E);  $z$  – of the outer layer of the particle board (sample F)



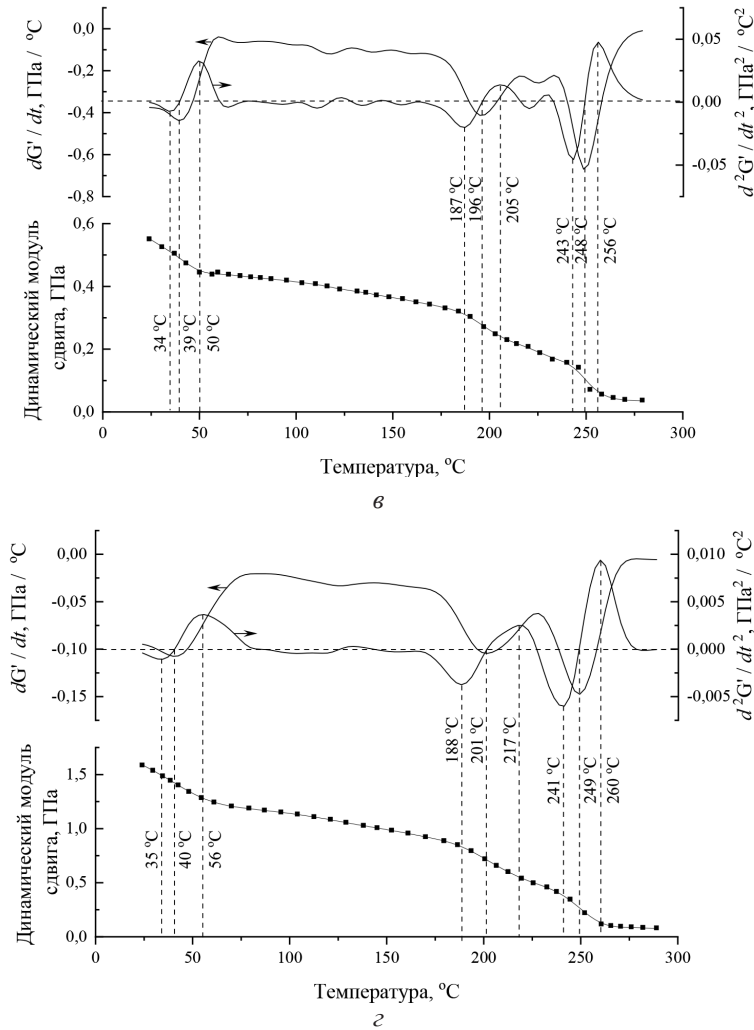


Рис. 2 (окончание). Температурные зависимости динамического модуля сдвига  $G'$ , первой и второй температурных производных  $G'$  для: *a* – наружного слоя ДСтП (образец А); *б* – внутреннего слоя ДСтП (образец D); *в* – внутреннего слоя ДСтП (образец E); *г* – наружного слоя ДСтП (образец F)

Fig. 2 (ending). Temperature dependences of the dynamic shear modulus  $G'$ , first and second temperature derivatives  $G'$ : *a* – of the outer layer of the particle board (sample A); *б* – of the inner layer of the particle board (sample D); *в* – of the inner layer of the particle board (sample E); *г* – of the outer layer of the particle board (sample F)

*Результаты исследования и их обсуждение*

На рис. 2 показаны примеры температурных зависимостей динамического модуля сдвига  $G'$ , его первой и второй температурных производных для наружных и внутренних слоев ДСтП. Для всех образцов характерно наличие трех диапазонов наиболее интенсивного изменения  $G'$ . Вид температурных зависимостей  $G'$ , представленных на рис. 2, *a*, *г*, можно считать близким к виду обычных температурных переходов в древесине разных пород [1, 11, 20, 21].

Переходный процесс в низкотемпературном диапазоне  $\sim 30...55$  °С следует считать мультиплетным и связывать с размораживанием локальных подвижностей макромолекул целлюлозы, процессами расстекловывания ее аморфной составляющей, а также с расстекловыванием части гемицеллюлоз и лигнина, пластифицированных водой [5]. Отмечаются некоторые флуктуации в положении характеристических точек данной переходной области от образца к образцу. Следует предполагать, что это является следствием методических ограничений при проведении эксперимента. Температура начала измерений  $G'$  оказывается выше температуры начала данного релаксационного процесса – весь диапазон переходной области не охватывается диапазоном измерений.

Вторая переходная область расположена в диапазоне  $\sim 185...210$  °С. На первый взгляд, она идентична переходному процессу, обнаруженному в древесине разных пород [1, 15, 20, 21], и обусловлена расстекловыванием непластифицированной части древесных гемицеллюлоз и лигнина. Однако для всех исследованных образцов ДСтП характерно наличие несимметричной формы кривых температурных зависимостей первой и второй температурных производных  $G'$ , хорошо видимое в пределах данного диапазона (рис. 2). Это позволяет говорить о наложении в нем как минимум двух релаксационных процессов. Наиболее вероятно, что один из них действительно обусловлен процессами расстекловывания компонентов древесины. Второй, менее заметный, незначительно смещен в более высокотемпературную область. Его следует связывать с процессом расстекловывания полностью отвержденной части связующего ДСтП. В пользу такой версии свидетельствует расположение данного перехода вблизи температуры, соответствующей максимальной температуре прессования ДСтП [14].

Третья переходная область, расположенная в диапазоне  $\sim 235...260$  °С, близка для всех образцов ДСтП и практически идентична переходной области в древесине, обусловленной плавлением кристаллитов древесной целлюлозы [1, 12].

Малые изменения от образца к образцу интенсивности и положения на температурной шкале переходных областей в ДСтП, соответствующих релаксационным и фазовым процессам в древесном наполнителе, указывают на неизменность молекулярного строения древесины в условиях технологического процесса получения ДСтП. Исходное молекулярное строение сохраняется независимо от слоя материала, образующего структуру ДСтП. Имеющиеся незначительные расхождения в положении характеристических точек переходных областей в ДСтП по сравнению с различными древесными породами [11, 15, 17, 20, 21] следует считать результатом использования при подготовке древесной массы смеси древесных частиц неконтролируемого породного состава.

Обратим внимание на область скачкообразного увеличения  $G'$  в образце внутреннего слоя ДСтП при температуре 140 °С (рис. 2, б). Увеличение  $G'$  с ростом температуры в целом не характерно для полимерных и композитных материалов, так как в стабильных структурах подобного рода изменения температуры неизбежно сопровождаются уменьшением жесткости системы из-за повышения подвижности кинетических элементов в образующих их компонентах [11, 12, 15]. Увеличение  $G'$  может быть вызвано техническим



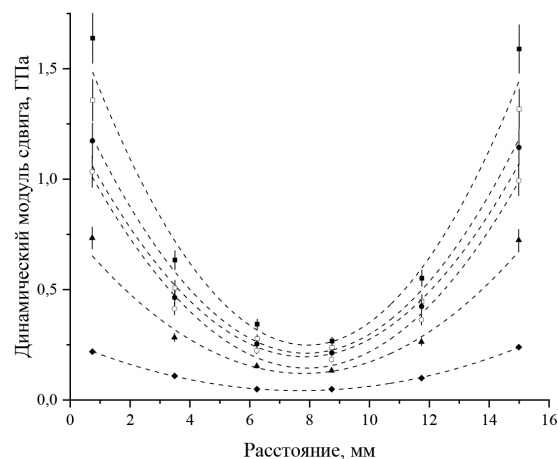
сбоем непосредственно во время проведения измерений, ошибками в ходе обработки результатов либо внутренними процессами в композитном материале, обусловленными химическими реакциями при нагреве, сопровождающем измерения методом ДМА.

Принимая во внимание, что подобная аномалия выявлена при неоднократных повторных измерениях, влияние методических ошибок исключается. Наиболее вероятной причиной кратковременного увеличения  $G'$  во внутренних слоях следует считать доотверждение связующего непосредственно в процессе измерений после нагрева образца до соответствующей температуры. Подобного скачка не наблюдается для образцов ДСтП, взятых из поверхностных слоев и слоев, располагающихся на удалении менее 5 мм от них (рис. 2, а, в, г). Следует предполагать, что в процессе горячего прессования исследованных образцов ДСтП в производственных условиях во внутренних слоях плиты полного отверждения связующего не произошло. Следовательно, часть связующего остается недоотвержденной и в готовом материале.

На рис. 3 и 4 показаны сравнительные срезы значений  $G'$  при разных температурах для разных слоев ДСтП. С удалением от поверхности материала наблюдается значительное уменьшение  $G'$ , что свидетельствует о снижении интенсивности межмолекулярного взаимодействия в его внутренних слоях. Уменьшение  $G'$  во внутренних слоях может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, дисперсной неоднородностью материала из-за технологических особенностей производства, при которых наружные слои формируются преимущественно на основе мелкодисперсных древесных частиц с целью придания плите облагороженного внешнего вида [7]. Использование мелкодисперсного наполнителя делает структуру поверхностных и приповерхностных слоев более плотной, воздушные пустоты приобретают меньший размер, связующее в этих слоях распределено более равномерно. Жесткость такой системы выше за счет большего по сравнению с внутренними слоями количества сшитых структур.

Рис. 3. Относительная зависимость  $G'$  слоев ДСтП от температуры: 24 (■), 50 (□), 100 (●), 150 (○), 200 (▲) и 250 (◆) °C

Fig. 3. Relative dependence of  $G'$  of the particle board layers on the following temperatures, °C: 24 (■), 50 (□), 100 (●), 150 (○), 200 (▲) and 250 (◆)



Во-вторых, может оказывать влияние и описанная выше неполная полимеризация связующего, присущая именно внутренним слоям. Для исследованного образца ДСтП характерны параболические формы зависимостей  $G'$  от места расположения соответствующего слоя независимо от температуры (пунктирные линии на рис. 3).  $G'$  для образцов, взятых из симметричных слоев

относительно средней части плиты, отличаются незначительно. Это свидетельствует о практически одинаковом составе древесно-полимерной массы и одинаковых условиях ее термообработки с обеих сторон плиты.

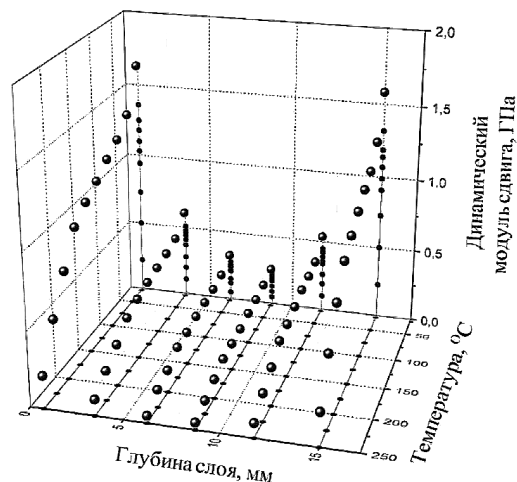


Рис. 4. Температурные зависимости  $G'$  и их распределение по слоям ДСтП

Fig. 4. Temperature dependences of  $G'$  and their distribution over the particle board layer

С увеличением температуры наблюдается уменьшение разницы между  $G'$  в поверхностных, приповерхностных и внутренних слоях. Если при комнатной температуре между поверхностными и внутренними слоями она составляет  $\sim 5,3$  раза, то при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  снижается до  $\sim 5,0$  раза, а при  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  – до  $\sim 4,5$  раз. Сводные данные о значениях  $G'$  для образцов из разных слоев ДСтП и относительной разнице между  $G'$  в поверхностных и внутренних слоях для разных температур показаны в табл. 2.

Таблица 2

Распределение значений  $G'$  в разных слоях ДСтП в зависимости от температуры  
Distribution of the  $G'$  values in different particle board layers depending on temperature

Слой	$G'$ , ГПа, при температуре, $^{\circ}\text{C}$									
	24	50	75	100	125	150	175	200	225	250
A	1,64	1,36	1,25	1,18	1,10	1,03	0,94	0,73	0,50	0,22
B	0,62	0,51	0,48	0,46	0,44	0,41	0,37	0,28	0,20	0,11
C	0,34	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,21	0,15	0,12	0,05
D	0,27	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,13	0,09	0,05
E	0,55	0,45	0,43	0,42	0,39	0,36	0,34	0,26	0,19	0,10
F	1,59	1,32	1,19	1,14	1,07	0,99	0,91	0,73	0,50	0,23
$(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$	2,76	2,79	2,68	2,64	2,61	2,62	2,61	2,70	2,56	2,14
$(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$	5,30	5,15	5,08	5,04	5,05	5,05	4,87	5,21	4,76	4,50

Рассмотрим динамику относительного изменения средних значений  $G'$  поверхностных и внутренних слоев ДСтП с увеличением температуры (табл. 2, рис. 5). Особенностью является тенденция к незначительному, но стабильному уменьшению отношений  $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$  и  $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$  с увеличением температуры вплоть до  $150\text{...}175\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 5). При более высокой температуре ( $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) проявляется кратковременное состояние выраженной нестабильности. Для отношения  $G'$  поверхностных (A, F) и приповерхностных

(В, Е) слоев (рис. 5, а) при 200 °С характерно незначительное увеличение, а затем интенсивное уменьшение вплоть до достижения предельных значений температуры. Отношение  $G'$  поверхностных (А, F) и внутренних (С, D) слоев при температуре 175 °С снижается более интенсивно, однако при 200 °С резко возрастает, после чего снова интенсивно уменьшается (рис. 5, б).

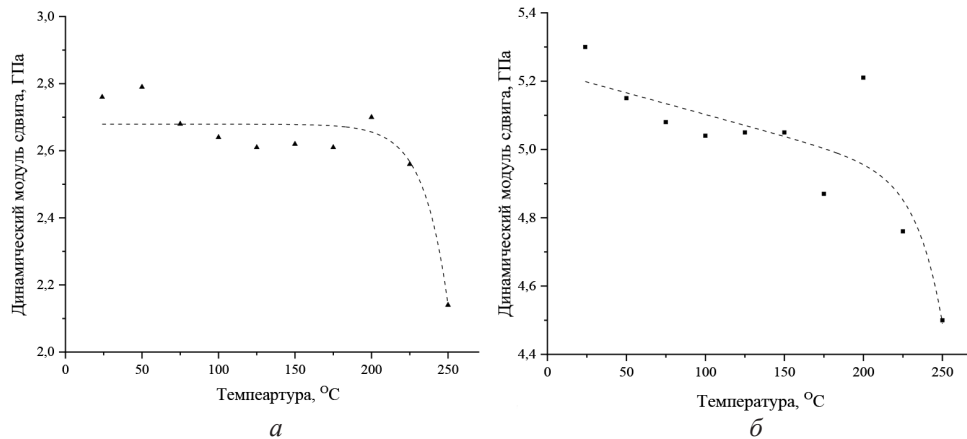


Рис. 5. Температурные зависимости отношения средних значений  $G'$  слоев ДСтП: а – отношение для поверхностных и приповерхностных слоев  $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$ ; б – отношение для поверхностных и внутренних слоев  $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$

Fig. 5. Temperature dependences of the ratio of the average  $G'$  values of the particleboard layers: а – ratio for surface and near-surface layers  $(G'_A + G'_F) / (G'_B + G'_E)$ ; б – ratio for surface and inner layers  $(G'_A + G'_F) / (G'_C + G'_D)$

Причину кратковременного увеличения отношения модулей сдвига наружных и внутренних слоев при температуре, близкой к 200 °С, следует связывать с отмеченным выше процессом доотверждения связующего во внутренних слоях, который протекает при температуре более 150 °С (рис. 2, б). Структура внутренних слоев при этом кратковременно становится менее стабильной и однородной из-за динамично протекающих конденсационных процессов. Меньшая выраженность увеличения отношения  $G'$  поверхностных и приповерхностных слоев при температуре 200 °С и в целом более однозначный характер зависимости (рис. 5, а) могут объясняться меньшей долей недоотвержденных компонентов связующего в этих слоях по сравнению с внутренними слоями.

Принимая во внимание прямую корреляцию  $G'$  с прочностными и гидрофобными свойствами композитных материалов [12], следует обратить внимание на необходимость контроля структуры внутренних слоев ДСтП. Недоотверждение связующего может стать причиной существенного снижения физико-механических показателей материала. Ведь даже при полном отверждении связующего внутренние слои из-за технологических особенностей производства ДСтП являются наименее прочной и водостойкой ее частью. Поэтому контроль за степенью отверждения должен быть важной составляющей технологического процесса древесных композитных материалов. Применение таких физических методов, как ДМА, в подобных случаях может стать удобным и надежным инструментом [8].

### Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы. Метод динамического механического анализа может быть использован для оценки молекулярного строения компонентов наружных и внутренних слоев древесностружечной плиты в диапазоне температур  $\sim 20 \dots 300$  °С. По изменению температурных зависимостей динамического модуля сдвига определено положение температурных переходов в компонентах материала. Наблюдаются значительные отличия в характере изменения динамического модуля сдвига наружных, промежуточных и срединных слоев древесностружечных плит с увеличением температуры. Выявлена тенденция уменьшения динамического модуля сдвига при переходе от поверхностных к внутренним слоям материала, обусловленная как различиями в их составе и морфологических показателях, так и характером процессов, протекающих при горячем прессовании.

Во внутренних слоях материала, расположенных на расстоянии более 5,5 мм от его наружной плоскости, при температуре  $140 \pm 5$  °С происходит нехарактерное для полимерных и композитных материалов увеличение динамического модуля сдвига по сравнению с его предшествующей величиной. Высказано предположение, что причиной обнаруженного увеличения является наличие недоотвержденных компонентов связующего во внутренних слоях древесностружечной плиты, обусловленное незавершенностью процесса отверждения при ее горячем прессовании в производственных условиях.

Для более полного отверждения связующего по всей толщине плиты и получения более однородного по свойствам материала рекомендуется увеличение продолжительности процесса прессования с организацией периодического лабораторного контроля за полнотой отверждения с использованием физических методов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беушева О.С., Скурыдина Е.М., Чемерис М.М., Мусько Н.П., Скурыдин Ю.Г. Влияние условий прессования на свойства плитных материалов, изготовленных из гидротермически обработанной древесины лиственницы // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 5(569). С. 48–50.

Beusheva O.S., Skurydina E.M., Chemeris M.M., Musko N.P., Skurydin Yu.G. The Influence of Pressing Condition on Properties of Plate Materials Made of Hydrothermally Treated Larch Wood. *News of higher educational institutions. Construction*, 2006, no. 5(569), pp. 48–50. (In Russ.).

2. Васильев В.В., Хоссейни С.З. Современные требования к древесным плитам для отделки // Древесные плиты: теория и практика: XX Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. С. 62–71.

Vasiliev V.V., Hosseini S.Z. Modern Requirements for Wood-Based Panels for Finishing. *Wood-Based Panels: Theory and Practice. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. Ed. by A.A. Leonovich. Saint Petersburg, Polytechnic University Publ., 2017, pp. 62–71. (In Russ.).

3. Волкова С.Н., Сивак Е.Е., Панкратьева О.В., Леванов Г.В., Боев Н.В., Конопченко О.А. Контроль качества строительных материалов из отходов лесной промышленности // Регион. вестн. 2021. № 3(59). С. 33–36.

Volkova S.N., Sivak E.E., Pankrat'yeva O.V., Levanov G.V., Boyev N.V., Konotopchenko O.A. Quality Control of Building Materials from Forest Industry Waste. *Regional'nyy vestnik*, 2021, no. 3(59), pp. 33–36. (In Russ.).

4. Древесные плиты: теория и практика: XX Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Политехн. ун-т, 2017. 122 с.

*Wood-Based Panels: Theory and Practice. Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference*. Ed. by A.A. Leonovich. Saint Petersburg, SPbSTU Publ., 2017. 122 p. (In Russ.).

5. Ерыхов Б.П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 228 с.

Erykhov B.P. *Non-Destructive Methods of Examination of Pulp and Paper and Wood-Based Materials*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 228 p. (In Russ.).

6. Кархова С.А. Анализ состояния производства и торговли листовыми древесными материалами в мире // *Baikal Research Journal*. 2018. Т. 9, № 2.

Karkhova S.A. State Analysis for Production and Trade of Boards and Plywood in the World. *Baikal Research Journal*, 2018, vol. 9, no. 2, art. 6. (In Russ.). [https://doi.org/10.17150/2411-6262.2017.9\(2\).6](https://doi.org/10.17150/2411-6262.2017.9(2).6)

7. Отлев И.А. Интенсификация производства древесностружечных плит. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 192 с.

Otlev I.A. *Intensification of Particle Board Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 192 p. (In Russ.).

8. Патент 2619359 С1 РФ, МПК G01N 25/00 (2006.01). Способ определения незавершенности процесса отверждения термореактивного связующего древесностружечной плиты: № 2016102862: заявл. 28.01.2016; опубл. 15.05.2017 / Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина.

Skurydin Yu.G., Skurygina E.M. *Method of Determination of the Noncompletion of the Process of the Thermoreactive Binder Curing of a Particle Board*. Patent RF, no. RU 2 619 359 C1, 2017. (In Russ.).

9. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия, 1973. 295 с.

Perepchko I.I. *Acoustic Research Methods for Studying Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 295 p. (In Russ.).

10. Сафин Р.Г., Степанов В.В., Хайруллина Э.Р., Гайнуллина А.А., Степанова Т.О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. Т. 17, № 20. С. 123–128.

Safin R.G., Stepanov V.V., Khairullina E.R., Gainullina A.A., Stepanova T.O. Modern Construction Composite Materials Based on Wood Waste. *Bulletin of the Technological University*, 2014, vol. 17, no. 20, pp. 123–128. (In Russ.).

11. Скурыдин Ю.Г. Строение и свойства композиционных материалов, полученных из отходов древесины после взрывного гидролиза: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2000. 147 с.

Skurydin Yu.G. *Structure and Properties of Composite Materials Obtained from Wood Wastes after Explosive Hydrolysis*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2000. 147 p. (In Russ.).

12. Скурыдина Е.М. Разработка технологии композиционных материалов на основе древесины и полимерных наполнителей: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2006. 170 с.

Skuridina E.M. *Development of the Technology of Composite Materials Based on Wood and Polymer Fillers*: Cand. Eng. Sci. Diss. Barnaul, 2006. 170 p. (In Russ.).

13. Старцев О.В., Салин Б.Н., Скурыдин Ю.Г. Баротермический гидролиз древесины в присутствии минеральных кислот // *Докл. АН*. 2000. Т. 370, № 5. С. 638–641.

Startsev O.V., Salin B.N., Skurydin Yu.G. Barothermal Hydrolysis of Wood in Presence of Mineral Acids. *Doklady Akademii Nauk*, 2000, vol. 370, no. 5, pp. 638–641. (In Russ.).

14. Чубинский А.Н., Варанкина Г.С., Русаков Д.С. Технология древесных плит. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. 37 с.

Chubinsky A.N., Varankina G.S., Rusakov D.S. *Technology of Wood-Based Panels*. Saint Petersburg, SPbFTU Publ., 2019. 37 p. (In Russ.).

15. Шахзадян Э.А., Квачев Ю.П., Панков В.С. Температурные переходы в древесине и ее компонентах // Высокомолекулярные соединения. 1992. Т. (А) 34, № 9. С. 3–14.

Shakhzadyan E.A., Kvachev Yu.P., Papkov V.S. Temperature Transitions in Wood and Its Components. *Polymer Science. Series A*, 1992, vol. 34, no. 9, pp. 3–14. (In Russ.).

16. Fengel D., Wegener G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Berlin, De Gruyter, 1983. 613 p. <https://doi.org/10.1515/9783110839654>

17. Müller U., Pretschuh C., Mitter R., Knappe S. Dielectric Analysis as a Cure Monitoring System for UF Particle Boards. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, vol. 73, pp. 45–50. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.07.016>

18. Oktay S., Kızılcan N., Bengü B. Oxidized Cornstarch – Urea Wood Adhesive for Interior Particleboard Production. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021, vol. 110, art. 102947. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102947>

19. Singh N., Rana A., Badhotiya G.K. Raw Material Particle Terminologies for Development of Engineered Wood. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, part 10, pp. 11243–11246. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.616>

20. Skurydin Yu.G., Skuridina E.M. Physical and Mechanical Characteristics of the Thermal-Wood Composition from Hydrolyzed Birch Wood. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 316, art. 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/316/1/012066>

21. Skurydin Yu.G., Skurydina E.M. Digital Differential Spectrometry in the Assessment of the Structural Characteristics of Wood and Wooden Composite Materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 806, art. 012030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/806/1/012030>

22. Startsev O.V., Salin B.N., Skuridin Y.G., Utemesov R.M., Nasonov A.D. Physical Properties and Molecular Mobility of the New Wood Composite Plastic “Thermobalite”. *Wood Science and Technology*, 1999, vol. 33, iss. 1, pp. 73–83. <https://doi.org/10.1007/s002260050100>

23. Uemura Silva V., Nascimento M.F., Resende Oliveira P., Panzera T.H., Rezende M.O., Silva D.A.L., Borges de Moura Aquino V., Rocco Lahr F.A., Christoforo A.L. Circular vs. Linear Economy of Building Materials: A Case Study for Particleboards Made of Recycled Wood and Biopolymer vs. Conventional Particleboards. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 285, art. 122906. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

---

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article