

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГНУТТЯ ДЕРЕВИНИ ЯЛИНИ

М.А.Кушпін¹, С.А.Грицак²

¹ Національний лісотехнічний університет України, Україна, ORCID: [0009-0000-7560-830X](https://orcid.org/0009-0000-7560-830X)

² Національний лісотехнічний університет України, Україна, ORCID: [0009-0007-2728-3521](https://orcid.org/0009-0007-2728-3521)

Проаналізовано технологічні особливості процесу гнуття деревини ялини як шпилькової породи, перспективної для виготовлення криволінійних елементів конструкційного та меблевого призначення. Показано, що придатність ялини до гнуття визначається сукупною дією анатомічних, фізико-механічних і технологічних чинників, серед яких найбільше значення мають особливості мікроструктури клітинної стінки, вологість, ширина річних шарів, щільність деревини, напрямок гнуття (радіальний чи тангентальний), а також параметри попередньої пластифікації. Водночас недостатньо дослідженим залишається комплексний вплив керованих параметрів саме технологічного процесу гнуття – вологості заготовки, режиму гідротермічної підготовки, товщини заготовки та радіуса згинання — на формоздатність матеріалу, пружне повернення та дефектоутворення.

Ключові слова: пластифікація, вологість, міцність при згині, модуль пружності, дефекти гнуття.

Вступ

Деревина належить до матеріалів, що поєднують відносно малу густину, достатню міцність, добру оброблюваність і широкий спектр технологічного застосування. Для шпилькових порід, зокрема ялини, ці властивості зумовлюють її широке використання у будівництві, столярно-мебловому виробництві, виготовленні клеєних і конструкційних елементів. Разом із традиційним використанням прямолінійних деталей зростає потреба у криволінійних заготовках, що дають змогу отримувати вироби складної форми, зменшувати матеріаломісткість конструкцій та підвищувати їх архітектурно-експлуатаційну виразність [1].

Технологічно гнуття деревини є складним процесом, у якому поєднуються тепломасообмін, структурна перебудова деревинної речовини та механічне деформування заготовки. На відміну від ізотропних матеріалів, деревина характеризується вираженою анізотропією і неоднорідністю, тому її поведінка при згині істотно залежить від вологості, щільності, напрямку волокон, співвідношення ранньої та пізньої деревини, положення в стовбурі та попередньої термовологісної обробки [1–4]. Саме тому вибір режимів гнуття для ялини не може ґрунтуватися лише на загальних уявленнях про міцність породи, а потребує врахування комплексу структурних і технологічних факторів.

Аналіз джерел показує, що для ялини звичайної достатньо добре досліджено загальні закономірності зміни міцності й жорсткості при згині залежно від вологості, походження деревини, радіального положення у стовбурі та гідротермічної модифікації [2–7]. Водночас саме технологічний аспект гнуття – тобто взаємозв'язок між вологістю заготовки, режимом її попередньої пластифікації, геометрією та якістю сформованої деталі – висвітлений значно слабше.

Тому актуальним є аналіз технологічних особливостей процесу гнуття деревини ялини та обґрунтування постановки задачі подальшого експериментального дослідження, спрямованого на встановлення раціональних режимів формування криволінійних заготовок.

Деревина ялини як об'єкт гнуття

З позицій деревинознавства деревина є природним анізотропним композитом, структура якого формується системою клітинних елементів, орієнтованих переважно вздовж осі стовбура. Для шпилькових порід характерні шарувата будова, виражена різниця між ранньою та пізньою деревиною, а також значна мінливість властивостей у радіальному та поздовжньому напрямках [1]. Це означає, що при механічному навантаженні, зокрема при згині, різні ділянки однієї й тієї самої заготовки можуть по-різному сприймати деформацію і руйнуватися за різними механізмами.

Для ялини важливе значення мають мікроструктурні характеристики клітинної стінки, частка пізньої деревини, положення відносно серцевини, ширина річних шарів, щільність та вологість. У дослідженнях механічних властивостей хвойної деревини показано, що модуль пружності негативно корелює з мікрофібрилярним кутом, тоді як щільність має істотний вплив на міцність і жорсткість при згині. При цьому внесок щільності у прогнозування міцності при згині є, як правило, вищим, ніж у прогнозування жорсткості [2]. Такі результати є принциповими для задачі гнуття, оскільки саме жорсткість і межа допустимої деформації визначають можливість надання заготовці нової форми без руйнування.

Суттєвою особливістю деревини ялини є мінливість властивостей які впливають на гнуття. Показано, що заготовки з периферійної частини стовбура мають вищу міцність і жорсткість порівняно з деревиною, розташованою ближче до серцевини. У дослідженні порівняння ялини з повільно- і швидкокорослих деревостанів встановлено, що деревина з повільнорослих насаджень мала на 57 % вищу міцність при згині та на 54 % вищий модуль пружності, а заготовки, вирізані ближче до кори, мали відповідно на 47 % і 30 % вищі показники, ніж прицентрові [3]. Отже, технологічна придатність ялини до гнуття не може розглядатися як стала характеристика породи; вона істотно змінюється залежно від положення та розміщення деревини в стовбурі.

Подібні висновки підтверджені і для конструкційної деревини ялини звичайної в інших роботах, де показано, що на густину, модуль пружності (MOE — Modulus of Elasticity) і міцність при згині (MOR — Modulus of Rupture) впливають місце росту, розміри дерева, висотне положення у стовбурі, вік і географічні чинники [4, 5]. Для технології гнуття це означає, що однаковий режим формування не забезпечуватиме однакового результату для всіх заготовок, якщо не буде враховано їх вихідний структурний стан.

Окрему роль в процесах гнуття відіграє вологість деревини. Відомо, що підвищення вологості деревини супроводжується зниженням її жорсткості і міцності, але водночас підвищує податливість до деформування. Для ялини експериментально підтверджено, що як для необробленої, так і для термічно модифікованої деревини зі зростанням вологості зменшуються показники згинальної міцності та жорсткості [6]. Саме тому вологість слід розглядати як один із базових факторів, що одночасно визначає і опір навантаженню, і здатність матеріалу до бездефектної формозміни.

Таким чином, деревина ялини як об'єкт гнуття характеризується складною структурною мінливістю, а її поведінка під час формування визначається взаємодією анатомічної будови, вологості, щільності та умов попередньої підготовки. Саме це обумовлює необхідність спеціального дослідження технологічних режимів гнуття для цієї породи.

Технологічні передумови пластифікації деревини ялини

У сухому стані деревина має обмежену пластичність, тому для її ефективного гнуття необхідна попередня пластифікація. Класичний підхід базується на гідротермічній обробці, тобто дії підвищеної температури та вологи, яка тимчасово послаблює внутрішні зв'язки в структурі клітинної стінки і підвищує здатність матеріалу до деформації [1]. У деревинознавчих джерелах прямо зазначено, що після пластифікації гарячою водою або водяною парою деревині можна надати нової форми, яка закріплюється в процесі сушіння [1]. Це положення є основою всієї технології гнуття.

Механізм пластифікації зумовлений зміною стану полімерної матриці деревини, передусім геміцелюлоз і лігніну, чутливих до дії температури й вологості. У роботах, присвячених механічним властивостям деревини після поздовжнього стиску, показано, що

підвищення вологості істотно змінює модуль пружності, межу міцності та коефіцієнт згину, а найкраща гнучкість досягається за вологості, близької до межі насичення волокон [7]. Хоча наведене дослідження стосується модифікованої деревини, воно підтверджує загальний для технології гнуття висновок: вологісний стан матеріалу є критичним для формоздатності.

Певний інтерес для задачі гнуття становить термічна модифікація. Вона змінює не лише експлуатаційні властивості деревини, а й її поведінку в зоні пружних і пластичних деформацій. Для ялини звичайної показано, що термічна модифікація впливає на MOR, хордову жорсткість, пластичний потенціал і модулі пластичності, а сильний зв'язок цих показників виявлено зі змінами вмісту геміцелюлоз [8]. Це свідчить про те, що технологічне керування пластичністю деревини пов'язане не тільки зі зміною її вологості, а й зі зміною хімічного та фізичного стану клітинної стінки внаслідок дії температури.

Разом із тим застосування високих температур не може розглядатися як універсальний спосіб підготовки деревини ялини до гнуття. У дослідженні впливу високої температури на механічні властивості ялини встановлено, що термообробка поліпшує розмірну стабільність, але водночас спричиняє зниження міцності при згині, яке для високотемпературних режимів становило близько 44–50 %, тоді як модуль пружності зменшувався менше — на 4–9 % [9]. Подібні результати наведено й у роботах, де термічна модифікація супроводжувалась втратою ударної міцності через деградацію геміцелюлоз та підвищення крихкості [10, 11]. Отже, надмірний тепловий вплив може знизити запас деформаційної здатності матеріалу і погіршити умови гнуття.

Практичний інтерес становлять і комбіновані методи пластифікації, у тому числі хімічні. Методологічно показовою є робота з дослідження гнуття деревини ясена, у якій як основні фактори процесу розглянуто товщину заготовки, радіус згинання і тривалість пластифікації, а ефективність технології оцінено за часткою якісно сформованих деталей [12]. Незважаючи на іншу породу, ця схема є цінною для побудови дослідження гнуття ялини, оскільки демонструє доцільність багатофакторного підходу до оцінювання процесу.

Отже, для ялини найбільш обґрунтованим напрямом підготовки до гнуття є гідротермічна пластифікація або її м'які комбіновані варіанти, що забезпечують підвищення податливості без глибокого термохімічного ушкодження структури.

Особливості механіки процесу гнуття деревини

Під час гнуття дерев'яна заготовка працює в умовах неоднорідного напружено-деформованого стану: зовнішні шари зазнають розтягу, внутрішні — стиску, а між ними розташовується нейтральний шар. Для деревини цей класичний розподіл ускладнюється анізотропією та неоднорідністю матеріалу, що зумовлює різну деформаційну реакцію окремих зон при однаковому зовнішньому навантаженні [1, 13]. Саме через це гнуття деревини не може розглядатися як простий випадок згину однорідної балки.

Найбільш небезпечними зонами при гнутті є зовнішня розтягнута поверхня та внутрішня стиснута зона. На зовнішньому боці виникає ризик утворення тріщин, а на внутрішньому — місцевого зминання, втрати стійкості клітинної структури та формування складок. За недостатньої пластифікації або малого радіуса гнуття ці явища розвиваються інтенсивніше. Тому технологічно важливо не лише знизити жорсткість заготовки перед формуванням, а й забезпечити такий режим навантаження, за якого деформація розподілятиметься максимально рівномірно.

Реальна межа допустимого радіуса гнуття для деревини ялини не є сталою величиною. Вона визначається поєднанням кількох факторів: товщини заготовки, вологості, ступеня пластифікації, орієнтації річних шарів і структурної однорідності деревини. Саме тому в технологічному сенсі доцільно говорити не про один “критичний” радіус, а про область допустимих співвідношень між товщиною заготовки, її станом та режимом формування. Такий підхід відповідає сучасній логіці експериментального планування в дослідженнях процесів гнуття [12].

Окремою технологічною проблемою є пружне повернення. Після зняття навантаження частина деформації в деревині релаксує, тому остаточна кривизна деталі виявляється

меншою, ніж у момент формування. Величина цього ефекту залежить від рівня попередньої пластифікації, вологості, ступеня фіксації форми та умов сушіння. Таким чином, пружне повернення слід розглядати як інтегральний показник ефективності всього процесу гнуття, а не лише як наслідок механічного розвантаження.

Аналіз сучасного стану питання і наукової прогалини

Аналіз зібраних джерел дає підстави зробити висновок, що для деревини ялини досить повно досліджено вплив структури й середовища на її механічні властивості. Показано істотну роль вологості, густини, умов росту, радіального положення в стовбурі та термічної модифікації у формуванні MOR і MOE [3–6, 8–11]. Це створює надійну базу для розуміння поведінки матеріалу при згині, але не дає вичерпної відповіді на питання про оптимальні режими його технологічного гнуття.

Більшість опрацьованих праць або характеризує ялину як матеріал загалом, або аналізує вплив окремих факторів на її міцність і жорсткість, або розглядає наслідки термічної модифікації. Натомість значно менше робіт присвячено саме поєднаному впливу керованих параметрів процесу гнуття – вологості заготовки, режиму пластифікації, товщини, радіуса згинання, швидкості формування та режиму фіксації – на частку якісних деталей, величину пружного повернення та характер дефектів. Для ялини ця прогалина особливо відчутна, оскільки висока структурна мінливість матеріалу потребує саме багатофакторного технологічного аналізу.

Отже, наукова проблема полягає не у відсутності відомостей про механічні властивості ялини як такі, а в нестачі систематизованих даних про закономірності її формозміни в реальному процесі гнуття. Саме ця обставина зумовлює необхідність спеціального експериментального дослідження, орієнтованого на технологічні режими, а не лише на традиційні механічні показники.

Прогнозування подальших досліджень

Об'єктом подальшого дослідження є технологічний процес гнуття деревини ялини.

Предметом дослідження є закономірності впливу вологості деревини, режиму попередньої гідротермічної підготовки, товщини заготовки та радіуса згинання на формоздатність матеріалу, пружне повернення форми та дефектоутворення.

Метою дослідження є визначення раціональних параметрів процесу гнуття деревини ялини, за яких забезпечується максимальний вихід якісних криволінійних заготовок при мінімальному пружному поверненні та без критичних пошкоджень структури.

Робоча гіпотеза полягає в тому, що ефективність гнуття деревини ялини визначається узгодженим поєднанням вологості заготовки, температурно-часового режиму попередньої пластифікації, товщини матеріалу та радіуса гнуття, причому існує область технологічних режимів, у межах якої досягається оптимальний баланс між податливістю деревини до деформування та збереженням її цілісності [1, 8, 12, 14].

Для досягнення поставленої мети доцільно розв'язати такі завдання:

- встановити вплив початкової вологості деревини ялини на її здатність до гнуття;
- визначити раціональні температурно-часові режими попередньої гідротермічної пластифікації;
- оцінити вплив товщини заготовки та радіуса згинання на якість сформованих деталей;
- встановити закономірності виникнення дефектів і величину пружного повернення після формування;
- побудувати математичну модель, що описує залежність якості гнутих заготовок від основних керованих параметрів процесу.

Як основні змінні фактори експерименту доцільно прийняти вологість деревини, температуру і тривалість попередньої обробки, товщину заготовки та радіус гнуття. Додатковими факторами за потреби можуть бути швидкість формування і тривалість фіксації форми. Як результуючі показники доцільно використовувати частку якісно сформованих заготовок, характер дефектів, величину пружного повернення та стабільність залишкової

кривизни після сушіння. Саме така система критеріїв дозволить оцінити процес з позицій його реальної технологічної ефективності.

Висновки

Деревина ялини є перспективним матеріалом для виготовлення криволінійних елементів, однак її поведінка в процесі гнуття визначається складною взаємодією анатомічних, фізико-механічних і технологічних чинників. Вирішальне значення мають вологість, щільність, радіальне положення в стовбурі, умови росту та режим попередньої пластифікації.

Встановлено, що в наявних дослідженнях достатньо повно висвітлено вплив вологості, структурної неоднорідності та термічної модифікації на міцність і жорсткість ялини при згині. Показано, що підвищення вологості знижує опір деформуванню, а високотемпературна обробка, попри підвищення розмірної стабільності, може суттєво зменшувати міцність та підвищувати крихкість деревини.

З'ясовано, що недостатньо дослідженим залишається комплексний вплив власне технологічних параметрів процесу гнуття деревини ялини на якість формування, пружне повернення та дефектоутворення. Саме ця обставина визначає наукову доцільність постановки спеціального багатофакторного експерименту.

Обґрунтовано, що подальше дослідження доцільно будувати з урахуванням таких основних факторів, як вологість деревини, режим попередньої гідротермічної обробки, товщина заготовки та радіус гнуття, а як критерії ефективності використовувати частку якісних деталей, характер дефектів, величину пружного повернення та стабільність форми після сушіння. Це створює наукову основу для розроблення раціональної технології гнуття деревини ялини.

Використані джерела

1. Смельянов В. Г., Шевченко С. А. *Основи деревознавства і лісового товарознавства*. Харків : ЕДЕНА, 2010.
2. Alteyrac J., Cloutier A., Ung C.-H., Zhang S. Y. *Mechanical properties in relation to selected wood characteristics of black spruce* // *Wood and Fiber Science*. 2006. Vol. 38, No. 2. P. 229–237.
3. Kliger R., Perstorper M., Johansson G., Pellicane P. J. *Bending properties of Norway spruce timber: comparison between fast- and slow-grown stands and influence of radial position of sawn timber* // *Annales des Sciences Forestières*. 1998. Vol. 55, No. 3. P. 349–364. DOI: <https://doi.org/10.1051/forest:19980306>
4. Høibø O., Vestøl G. I., Fischer C., Fjeld L., Øvrum A. *Bending properties and strength grading of Norway spruce: variation within and between stands* // *Canadian Journal of Forest Research*. 2014. Vol. 44, No. 2. P. 128–135. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0187>
5. Fischer C., Vestøl G. I., Høibø O. *Modelling the variability of density and bending properties of Norway spruce structural timber* // *Canadian Journal of Forest Research*. 2016. Vol. 46, No. 7. P. 978–985. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0022>
6. Arnold M. *Effect of moisture on the bending properties of thermally modified beech and spruce* // *Journal of Materials Science*. 2010. Vol. 45, No. 3. P. 669–680.
7. Báder M., Németh R. *Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood* // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019. Vol. 77, No. 6. P. 1009–1019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01448-1>
8. Gaff M., Šafaříková L., Gašparík M. *Plasticity properties of thermally modified timber in bending: the effect of chemical changes during modification of European oak and Norway spruce* // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 157. P. 106–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.050>
9. Bekhta P., Niemz P. *Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood* // *Holzforschung*. 2003. Vol. 57, No. 5. P. 539–546.

10. Gaff M., Kačík F., Gašparík M. *Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood* // *Composite Structures*. 2019. Vol. 216. P. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.091>
11. Yildiz S., Gezer E. D., Yildiz U. C. *Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat* // *Building and Environment*. 2006. Vol. 41, No. 12. P. 1762–1766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.017>
12. Грицак С. С. *Дослідження технологічного процесу гнуття деревини ясеня* // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 2024. Vol. 50. P. 52–64. DOI: <https://doi.org/10.36930/42245005>
13. Fajdiga G., Rajh D., Nečemer B., Glodež S., Šraml M. *Experimental and numerical determination of the mechanical properties of spruce wood* // *Forests*. 2019. Vol. 10, No. 12. Art. 1140. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10121140>
14. Грицак С. А. *Аналіз способів отримання заготовок криволінійної форми для деталей меблів* // *Вісник Харківського державного університету харчування та торгівлі*. 2017. № 2. С. 173–181. URL: <https://www.researchgate.net/publication/388966989>