

## РАЦИОНАЛНА МАКРОСТРУКТУРА НА ПЛОЧЕСТИТЕ КОМПОЗИТИ ОТ ДЪРВЕСНИ ЧАСТИЦИ

Николай Йосифов<sup>1</sup>, Стефан Делин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Лесотехнически университет – София, e-mail: nikyosif@mail.bg

<sup>2</sup> L.A. – USA, e-mail: deltica@aol.com

### РЕЗЮМЕ

Предмет на изследването е макроструктурата на плочестите композити от дървесни частици (ПКДЧ) и възможностите за рационализиране на структуроформиращите ѝ параметри с оглед повишаване на ефективността при употребата на този материал за конструктивни цели.

Физическата същност на ПКДЧ може да се дефинира като анизотропен слоест дървесно-полимерен материал, изграден от адхезионно свързани дървесни частици. Макроструктурната характеристика и физико-механичните свойства на композита предопределят широката му употреба в конструкциите на мебелите.

Въз основа на теоретични и експериментални изследвания е установена рационалната макроструктурна характеристика на ПКДЧ и са доказани рационалните размери и дисперсен състав на дървесните частици. Разработени и анализирани са деформационно-якостни модели на ПКДЧ при кратковременно и дълговременно натоварване.

С помощта на регресионно многофакторно математическо моделиране е установено влиянието на структуро-формиращите фактори върху комплексния качествен показател на ПКДЧ.

**Ключови думи:** плочести композити от дървесни частици, модел, макроструктура, плътност, структуро-формиращ фактор, лепилен слой, слепване, комплексен качествен показател.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Макроструктурната характеристика на плочестите композити от дървесни частици (ПКДЧ) се определя от физическата им същност. Те са технологично формирани чрез пиезотермично обработване дървесно-полимерни композити от дървесни частици с конструктивно предназначение, в които полимерната съставка изпълнява ролята на свързващо вещество. Свойствата на анизотропния плочест композит от дървесни частици се определят до голяма степен от: кохезионните сили на сцепление между анатомичните елементи на изходната дървесина; адхезионната якост на лепилните слоеве между частиците; устойчивостта към влажностни и температурни въздействия.

Рационалната макроструктура на ПКДЧ се базира на изискванията относно качествените и икономическите показатели към композита като конкурентноспособен конструкционен материал, в т.ч. към: структурно-геометричните му параметри, структурно-физичните му показатели, структурно-морфологичната характеристика на дървесните частици, структуро-адхезионната характеристика.

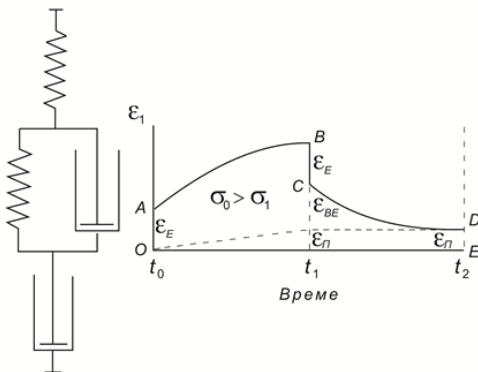
Приложението на ПКДЧ в конструкциите на мебелите и строителството е свързано с определени изисквания към физико-механичните им свойства и преди всичко към деформационно-якостните им свойства, които се определят главно от макроструктурната им характеристика. Ето защо те са и надеждни критерии

за оценка на рационалността на макроструктурните параметри на ПКДЧ.

## 2. ТЕОРЕТИЧНА ПРЕДПОСТАВКА ЗА ИЗБОР НА ОЦЕНЪЧНИТЕ КРИТЕРИИ

Изборът на оценъчните критерии относно рационалните макроструктурни параметри на ПКДЧ е свързан с експлоатационните изисквания към този конструктивен композит. Ето защо за осигуряване на необходимата надеждност на конструкциите от ПКДЧ е нужно доброто познаване както на механичните им свойства при еднократно натоварване, а така също и изменението на деформационно-якостната им характеристика в течение на времето на експлоатация, т.е. деформацията на пълзене. Изискванията към по-важните механични свойства на ПКДЧ (якост на огъване, якост на опън перпендикулярно на плоскостта на плочата и модул на еластичността при огъване) са регламентирани в съответните нормативни документи (стандарти).

За практиката интерес представлява деформационно-якостната характеристика на ПКДЧ при продължително натоварване. В тази връзка композита от дървесни частици може да се разглежда като еластично-пластичен материал с аморфна структура и реологични свойства близки до тези на дървесината (Уголев 1965, Енчев 1984).



Фиг. 1. Реологичен модел на ПКДЧ

При продължително натоварване в композита може да възникнат следните деформации: а) еластични ( $\epsilon_E$ ), които възникват в момента на прилагане на външно натоварване; б) вискоеластични ( $\epsilon_{VE}$ ), свързани с обратимо прекъсване на молекулните вериги; в) пластични ( $\epsilon_{PI}$ ), свързани с необратимо прекъсване на молекулните вериги в течение на времето. На фиг. 1 е даден комплексния реологичен модел на ПКДЧ, където добре е представена взаимната връзка на еластичните и пластичните свойства на материала. Съгласно модела деформационните напрежения се извеждат от законите за деформация на простите елементи – последователно свързани идеално еластично тяло на Hook ( $\epsilon_E = \sigma/E$ ), еластично-пластично тяло на Voigt ( $\epsilon_{VE} = \epsilon_E + \epsilon_{PI}$ ) и идеално пластично тяло на Newton ( $\epsilon_{PI} = t \cdot \sigma/\eta$ ). Така общата деформация се състои от: незабавната еластична деформация на пружината  $\epsilon_E = \sigma/E$  (правата OA); забавената еластична деформация  $\epsilon_{VE} = \epsilon_E + \epsilon_{PI}$  (кривата AB); и пластичната деформация  $\epsilon_{PI} = t \cdot \sigma/\eta$  (кривата CD) при отстраняване на натоварването. При зададено постоянно напрежение ( $\sigma_0$ ) деформацията ( $\epsilon$ ) в дадената релаксираща среда се определя съгласно кривата на пълзене по формулата

$$\epsilon = \sigma_0 \left[ 1/E + (1/E_1) e^{-E_1 t/\eta} \right], \quad (1)$$

където  $E$  и  $E_1$  са модулите на линейна деформация, съответно при прилагане и отстраняване на натоварването;

$t$  – общата продължителност на натоварването;

$\eta$  – коефициент на вискозитет.

Релаксацията на напреженията се характеризира с израза:

$$\sigma(t) = \epsilon(t) E \int_0^t R(t-\tau) \epsilon(\tau) d\tau, \quad (2)$$

където  $R(t - \tau)$  е ядрото на релаксация;

$(t - \tau)$  – времето от момента на първото натоварване.

При продължително натоварване с постоянен товар, т.е. при  $\sigma(t) = \sigma_0$  за  $\varepsilon(t)$  се получава

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 / E \left( 1 + \int_0^t Q(t - \tau) d\tau \right), \quad (3)$$

където  $Q(t - \tau)$  е ядрото на пълзене или в случая (при  $\sigma_0$ ) скоростта на деформацията.

Изследванията в МЛТИ [14] доказват, че ПКДЧ се деформират линейно при незабавно и нелинейно при продължително натоварване. Функционалните зависимости  $\varepsilon(t)$  за деформациите и  $\sigma(t)$  за напреженията се определят с апроксимация. За описание на ядрото на релаксация се приема емпиричната формула:

$$R(t) = A \cdot e^{-pt} \cdot t^{q-1}, \quad (4)$$

където параметрите са определени за ПКДЧ с плътност от  $780 \text{ kg/m}^3$  и имат следните стойности:  $A = 0,1$ ;  $p = 0,081$ ;  $q = 0,25$ .

При  $t \rightarrow \infty$  за безкрайната деформация се получава

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E} \left[ 1 + \int_0^{\infty} Q(t - \tau) d\tau \right]. \quad (5)$$

Съгласно принципа на Волтер модулът на еластичност при продължително натоварване ( $E_{пр}$ ) се изразява с уравнението:

$$E_{пр} = E_0 / (1 + k), \quad (6)$$

където  $E_0$  е началният модул на еластичност;

$k$  – експериментално определена константа, която зависи от еластичните провисвания ( $f_i$ ) при незабавно и продължително натоварвания.

Поведението на ПКДЧ при продължително експлоатационно натоварване е най-достоверният метод на оценка на рационалните макроструктурни елементи на композитните плочи. При това е установено [2, 3, 15, 17], че срокът на експлоатация на конструкциите от ПКДЧ превишава времето за интензивно пълзене на материала, а също така – стандартизираните изисквания към якостните показатели на конструкционните плочи са значително по-ниски от реално достижимите.

Изследванията на Поташев и Лапшин (1982), Йосифов и Делин (2010) и др. показват, че коравината при огъване ( $EJ_y$ ) и срязване ( $GS$ ) са много важни структурни характеристики на конструктивните елементи от ПКДЧ. Ето защо при оразмеряването на мебелните конструкции от композитни плочи е препоръчително да се отчита и тяхната коравина при огъване и срязване при продължително натоварване. За съжаление обаче засега прякото отчитане на деформационните им параметри е свързано със значителни трудности.

ПКДЧ като конструктивни елементи най-често се натоварват в посока перпендикулярна на плоскостта им, в резултат на което възникват нормални ( $\sigma$ ) и тангенциални ( $\tau$ ) напрежения и деформации ( $\varepsilon$ ). В инженерната практика препоръчително се работи с така наречените допустими нормални ( $\sigma_{доп}$ ) и тангенциални ( $\tau_{доп}$ ) напрежения с препоръчителен коефициент на сигурност ( $C_k$ ). За този материал  $C_k > 4$  (Йосифов и Делин, 2010).

Тогава

$$\sigma_{доп} = \sigma_0 / C_k = \sigma_0 / 4 \text{ и } \tau_{доп} = \tau_0 / C_k = \tau_0 / 4. \quad (7)$$

Според теорията на Мор [4]  $\max \tau < 0,5 \sigma_{доп}^{оп}$ .

Освен това са установени и зависимости между якостта на огъване ( $\sigma_{ог}$ ) и други механични свойства на ПКДЧ, като

модула на еластичност при огъване  $E_{ог}$  (Йосифов 1978, 1989; Кючуков и Йосифов 1981), якостта на опън –  $\sigma_{оп}$  и якостта на напречен опън –  $\sigma_p$  (Йосифов 1978).

За установяване на рационални нива на стойностите на параметрите, характеризиращи макроструктурата на ПКДЧ, трябва да се вземе предвид физическата същност на материала, т.е. че композитната плоча е многослойна по напречното си сечение, като в зависимост от функционалното предназначение на слоевете те са изградени от различни по форма и размери дървесни частици. Структурата на ПКДЧ най-често е модифицирана като три- или петслойна. Например, при петслойната класическа структура на плочите най-външните им слоеве са с много малка дебелина (под 0,2 mm) и са изградени от прахообразни дървесни частици и имат предназначение като покривни слоеве за осигуряване на необходимата гладкост за последваща повърхностна обработка. Непосредствено под повърхностните слоеве са разположени конструкционните (при трислойна структура – лицевите) слоеве, които имат най-голямо значение за деформационно-якостната характеристика на плочестите композити. Те са изградени от фини дървесни частици (най-често паралелепедни). Средният слой на плочите е със сравнително най-голяма дебелина и е изграден от по-груби дървесни частици, което е икономически целесъобразно.

Приложението на ПКДЧ като конструктивни елементи в мебелите е пряко свързано с устойчивостта им на огъващи натоварвания, която до голяма степен зависи от якостно-деформационната характеристика на конструкционните (лицевите) им слоеве. Ето защо рационализирането на макроструктурните параметри на тези слоеве е обект на множество

изследвания [2, 3, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22 и др.].

Производството на ПКДЧ с рационална макроструктура се постига само чрез прилагането на установени и проверени в практиката научно обосновани изисквания към макроструктурните им параметри, те могат да се класифицират в следните групи: структурно-геометрични (дебелина и дисперсен състав на слоевете от дървесни частици); структурно-физични (обемна плътност, относителна порестост и степен на уплътняване на дървесината); структурно-морфологични (размери и размерни отношения на дървесните частици, специфична площ на частиците); структурно-адхезионни (дебелина на лепилния слой и степен на контактуване по лепилен слой).

За производствената практика е нужна по-бърза процедура за определяне на деформативно-якостната характеристика на ПКДЧ, което засега може да се осъществи с удовлетворителна точност чрез приемането на един универсален критерий. От извършените по-горе анализи се установи, че показателят якост на огъване може да се използва с успех за прогнозиране на деформационно-якостната характеристика на ПКДЧ, тъй като останалите якостни показатели са във функционална връзка с него, т.е.  $E_{ог} = f(\sigma_{ог})$ ;  $\sigma_{оп} = f(\sigma_{ог})$ ;  $\sigma_p = f(\sigma_{ог})$ . В тази връзка трябва да се осигури провеждане на технологическия процес за производство на ПКДЧ съобразно с изискванията за рационални технологични и макроструктурни параметри.

От това произтича необходимостта от съставяне на алгоритъм за определяне на  $\sigma_{ог}$  на ПКДЧ при конкретни технологични условия на производството им с оглед, при необходимост, рационализиране на макроструктурните им параметри.

Предвид на горното, въз основа на наши изследвания, предлагаме следната емпирична формула за определяне  $\sigma_{ог}$  на ПКДЧ в зависимост от технологичните и макро-конструктивните параметри:

$$\sigma_{ог} = k_d \cdot \sigma_d'' (1 - 1/k_{TM}), \quad (8)$$

където:  $\sigma_d''$  е якостта на опън надлъжно на дървесните влакнини на суровината;

$$k_{TM} = k_p \cdot k_v \cdot k_\rho \cdot k_s = \left(\frac{p_{лс}}{100}\right) \cdot \left(\frac{\ell_{лс}}{\delta_{лс}}\right) \cdot \left(\frac{\rho_{п}^o}{\rho_d^o}\right) \cdot \left[\frac{1,6 \cdot s_{ол} (1 - \Pi_{отн})}{s_p}\right], \quad (9)$$

където:  $k_p = (p_{лс}/100)$  е коефициент, отчитащ влиянието на процентното участие на свързващо в лицевите слоеве ( $p_{лс}$ );

$k_v = \ell_{лс}/\delta_{лс}$  – коефициент, отчитащ влиянието на стройността на частиците на лицевите слоеве – дължина ( $\ell_{лс}$ ) и дебелина ( $\delta_{лс}$ );

$$k_\rho = \frac{\rho_{п}^o}{\rho_d^o} \text{ – коефициент, отчитащ}$$

уплътнението на дървесината в лицевите слоеве ( $\rho_d^o$  – плътност на абс. сухата изходна дървесина;  $\rho_{п}^o$  – плътност на сухата плоча);  $k_s = 1,6s_{ол} \cdot (1 - \Pi_{отн})/s_p$  – коефициент, отчитащ влиянието на контактуването на частиците по лепилен слой ( $s_{ол}$  – олепилена специфична площ на частиците,  $s_p$  – специфична площ на частиците,  $\Pi_{отн}$  – относителна обемна порестост на плочите).

В съставения алгоритъм като основен параметър е якостта на опън надлъжно на дървесните влакна на дървесината. Но за оценка на якостта на огъване на плочестия композит като анизотропно тяло Поташев и Лапшин (1982) предлагат да се използва преобразувания вид на емпиричната формула на Kollmann (1967).

$$\sigma_{ог} = \sigma_d'' / \sqrt{\left(\sigma_d'' / \sigma_d'\right) + 1}. \quad (10)$$

$k_d$  – коефициент, отчитащ влиянието на дървесния вид ( $k_d = 0,2$  за твърда широколистна дървесина и  $k_d = 0,3$  за иглолистна дървесина);

$k_{TM}$  – коефициент, отчитащ влиянието на технологичните и макроструктурните фактори.

Коефициентът  $k_{TM}$  се определя от производението:

Трябва да се отбележи обаче, че тази формула не е пригодна за точни и надеждни инженерни изчисления.

Въз основа на експериментални изследвания са установени следните гранични нива на рационалните, технологични и структурни параметри:  $k_p = 0,11 \div 0,13$  (при  $p_{лс} = 11 \div 13\%$ );  $k_v = 40 \div 72$  (при  $\ell_{лс} = 12 \div 16 \text{ mm}$  и  $\delta_{лс} = 0,22 \div 0,30 \text{ mm}$ );  $k_\rho = 1,05 \div 1,10$  (за  $\rho_d^o > 640 \text{ kg/m}^3$ ) и  $k_\rho = 1,10 \div 1,18$  (за  $\rho_d^o < 640 \text{ kg/m}^3$ );  $k_s = 0,576 \div 0,648$  (при  $\Pi_{отн} = 0,10$  и  $s_{ол}/s_p = 0,40 \div 0,45$ ) и  $k_s = 0,544 \div 0,612$  (при  $\Pi_{отн} = 0,15$  и  $s_{ол}/s_p = 0,40 \div 0,45$ ). При тези нива на коефициентите се получават гранични стойности за  $\sigma_{ог}$  от 16,2 до 22,9 N/mm<sup>2</sup> за ПКДЧ от твърда широколистна дървесина с  $\rho_d^o > 640 \text{ kg/m}^3$  и от 16,7 до 23,2 N/mm<sup>2</sup> – от иглолистна дървесина с  $\rho_d^o < 640 \text{ kg/m}^3$ . Получените нива за  $\sigma_{ог}$  на ПКДЧ напълно удовлетворяват изискванията за качествените и икономическите показатели на този композит, а също за лека технологична реализуемост.

## ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ТЕОРЕТИЧНИТЕ ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ОЦЕНЪЧНИТЕ КРИТЕРИИ ЗА РАЦИОНАЛНА МАКРОСТРУКТУРА НА ПКДЧ

Макроструктурата на ПКДЧ характеризира основните свойства на този конструкционен дървесно-полимерен композит, основно предназначен за употреба в конструкциите на мебелите и в строителството.

Рационалната макроструктура на плочестия композит от дървесни частици се обуславя от рационалните макроструктурни параметри, стойностите на които може да се прогнозира и промишлено реализират при определени нива на технологичните фактори. Тези параметри може да се групират като: структурно-геометрични; структурно-физически; структурно-морфологични и структурно-адхезионни.

ПКДЧ като конструкционен материал трябва да отговаря на определени експлоатационни изисквания относно деформационно-якостната си характеристика при продължително натоварване (главно на устойчивост на огъване), въз основа на което са съставени: реологичен модел за деформациите, кривата на пълзене и формулите за релаксационните напрежения. При това те са близки до вече установените за други материали с основно участие на дървесина.

Въз основа на установени функционални зависимости между модула на еластичност при огъване при еднократно натоварване и модула на еластичност при продължително натоварване  $E_{np} = f(E_0)$ , а също  $E_{ог} \equiv E_0 = f(\sigma_{ог})$  е съставен алгоритъм за изчисляване на  $\sigma_{ог}$  при различни нива на технологичните фактори и макроструктурни параметри. Предвид също на установени зависимости между механичните

свойства на ПКДЧ, то, за по-бързи инженерни пресмятания с удовлетворителна за практиката точност, като критерий за якостно-деформационните свойства на този материал, с успех може да се използва предложената формула за  $\sigma_{ог}$ .

## 3. РАЦИОНАЛНИ МАКРОСТРУКТУРНИ ПАРАМЕТРИ НА ПКДЧ

Рационалната макроструктура на плочестите композити от дървесни частици изисква параметрите им също да отговарят на условията за рационалност, т.е. да са оптимални по отношение на качествените и икономическите си показатели и целесъобразни за сравнително лека технологична реализация. На този проблем са посветени множество публикации както у нас [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 и 14], така и в чужбина [1, 2, 3, 15, 17, 18, 19, 20, 21 и 22]. Ето защо, поради ограничения обем на настоящата статия, ще се направи анализ само на някои от посъществените изследвания.

### 3.1. РАЦИОНАЛЕН СЪСТАВ НА ПКДЧ

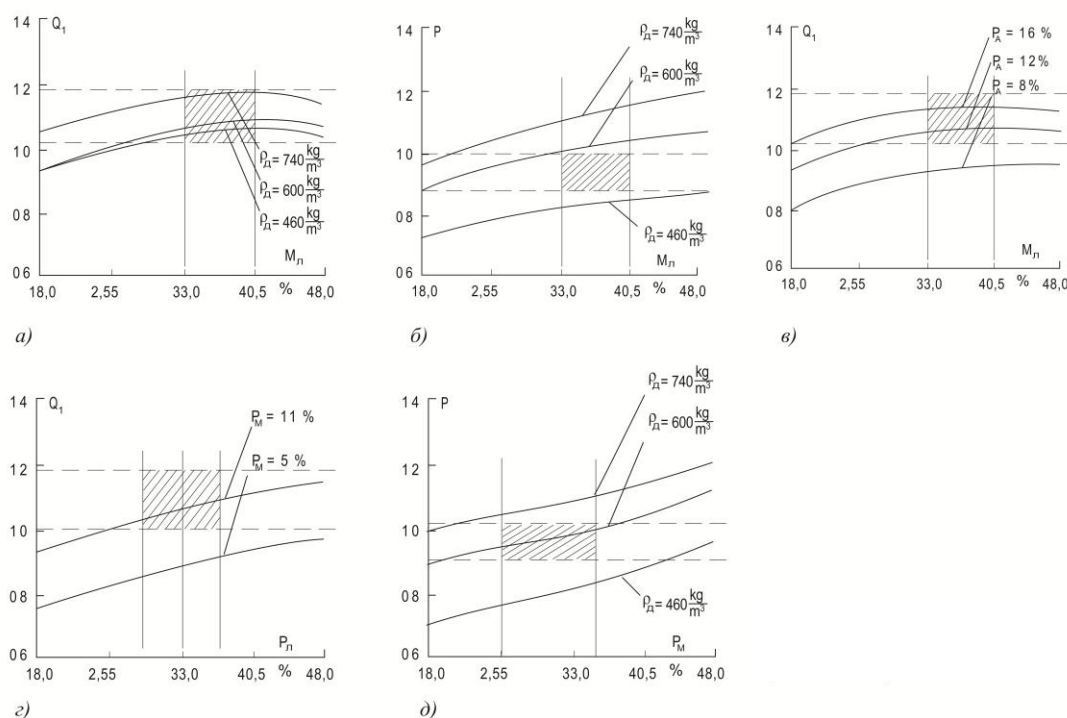
Дървесно-полимерният композит ПКДЧ се състои от адхезионно свързани дървесни частици. За получаването на дървесните частици могат да се използват почти всички лигноцелулозни материали. Полимерната съставка е свързващото вещество, което най-често КФС (карбамидформалдехидна смола) за плочите с интериорно предназначение и ФФС (фенолформалдехидна смола) за плочите с екстериорно предназначение. В състава могат да бъдат включени и други химически вещества, като хидрофобизатори, антипирени, антисептици и др.

За класическата трислойна структура на плочестия композит важно значение имат следните параметри: плътност на изходната дървесна суровина ( $\rho_d^0$ ), която

е определяща за плътността на композита; процентното участие на лицевите слоеве в общата дебелина на плочата ( $M_L$ ), което е от особено значение за якостно-деформационните свойства на композита; процентното участие на свързващо вещество в лицевите (конструкционните) слоеве ( $p_{лс}$ ) и в междинния (среден) слой на плочата ( $p_{мс}$ ).

За установяване на влиянието на горните фактори върху комплексния качествен показател ( $Q$ ) и относителните производствени разходи ( $P$ ) се проведе многофакторен лабораторен експеримент за плочи с дебелина 16 mm. Изведоха се адекватни ( $F < F_T$ ) регресионни зависи-

мости от втори ред, като регресионните коефициенти на уравненията са дадени в табл. 2. Въз основа на регресионните уравнения се построиха графиките на фиг. 2. В критерия  $Q$  са включени стандартните физико-механични свойства в бездимензионален вид и със съответни коефициенти на тежест, като например общия коефициент на тежест за якостните свойства е 0,7, а за физичните свойства – 0,3. Другият критерий  $P$  е икономически и отразява относителните разходи (материали и енергия) на единица продукция. На графиките чрез заштриховане са отбелязани рационалните зони на вариране на стойностите на изследваните параметри.



**Фиг. 2.** Влияние на някои структуроформиращи параметри върху комплексния качествен показател  $Q_1$  и относителните производствени разходи  $P$

От графиките на фиг. 2 а, б се вижда, че по-ниските стойности за  $\rho_d^0$  благоприятстват за получаването на КПДЧ с по-високи качествени показатели и по-ниски производствени разходи. При използване

на дървесна суровина с много висока плътност ( $\rho_d^0 > 740 \text{ kg/m}^3$ ) не може да се осигури стойност на  $P$  под 1. Благоприятната зона за  $M_L$  е в границите от 35 до 40 %.

Таблица 1. Стойности на регресионните коефициенти на уравненията за  $\rho$  и  $P$ 

$B_i$	Q	$\rho$	$B_{ij}$	Q	P	$B_{ii}$	Q	P
$B_0$	1,069	0,992	$B_{12}$	-0,014	0,024	$B_{11}$	0,064	-0,036
$B_1$	0,051	0,142	$B_{13}$	0,035	0,025	$B_{22}$	-0,071	-0,013
$B_2$	0,056	0,079	$B_{14}$	0,005	-0,009	$B_{33}$	0,021	-0,045
$B_3$	1,103	0,080	$B_{23}$	-0,007	-0,034	$B_{44}$	0,089	0,017
$B_4$	0,088	0,104	$B_{24}$	-0,003	-0,018	-	-	-
-	-	-	$B_{34}$	0,003	-0,030	-	-	-

Графиките на фиг.2, в и г показват, че увеличаването на процентното съдържание на свързващо вещество  $\rho_{лс}$  и  $\rho_{мс}$  в композита води до повишаване на стойността на комплексния качествен показател. При по-ниски стойности на  $\rho_{лс}$  от 9 % и на  $\rho_{мс} < 8$  % не може да се достигне до минималната стойност на  $Q > 1$ . Същевременно обаче при стойност на  $\rho_{мс} > 8,5$  (фиг. 2, д) относителните производствени разходи нарастват над максимално допустимите ( $P_{л} < 1$ ). Следователно, като рационални стойности на изследваните параметри могат да се приемат:  $\rho_{лс} = 10 \div 13\%$ , и  $\rho_{мс} = 8 \div 9$  %.

### 3.2. РАЦИОНАЛНА ОБЕМНА ПЛЪТНОСТ НА ПКДЧ

Един от най-значимите структурно-физични параметри на ПКДЧ е обемната им плътност ( $\rho_n$ ). Тя определя до голяма степен устойчивостта им на деформационни натоварвания. Експериментално са установени (Йосифов 1967, 1981, 1984, 1988, 1989; Йосифов и Делин 2010; Kollmann 1967; Kühne и Niemi 1980; Поташев и Лапшин 1978 и др.) зависимости между плътността на ПКДЧ и якостно-деформационните им характеристики – модул на еластичност при огъване, якост на огъване, якост на опън и якост на опън перпендикулярно на плоскостта. Повече-

то от тези зависимости са регресионни уравнения от втора степен, т.е. имат параболичен характер.

При това, в цитираните по-горе изследвания, структурният параметър „плътност“ се приема и като оценъчен критерий при прогнозиране на якостно-деформативните свойства на плочестите композити. Рационалната стойност на този структурен параметър ( $\rho_N$ ) трябва да гарантира от една страна изискванията към якостно-деформативните свойства и от друга – икономическите показатели на ПКДЧ, т.е.  $\rho_{кр}^{кач} \leq \rho_N \leq \rho_{кр}^{ик}$ .

За определяне на рационалната плътност на ПКДЧ е изведено регресионно уравнение [11] в зависимост от технологичните фактори:

$$x_1 > \rho_d^0 = 460 \div 740 \text{ kg/m}^3;$$

$x_2 > M_{л} = 18 \div 48\%$ ;  $x_3 > \rho_{лс} = 8 \div 16\%$  и  $x_4 > \rho_{мс} = 5 \div 11\%$ . Стойностите на регресионните коефициенти на математическия модел са дадени в табл. 2. Средните стойности на технологичните фактори гарантират получаването на рационална стойност за плътността на ПКДЧ в размер на  $694 \text{ kg/m}^3$ . А например при  $\rho_d^0 = 650 \text{ kg/m}^3$ , критичните стойности за плътността на плочите са:  $\rho_{кр}^{кач} > 665 \text{ kg/m}^3$  и  $\rho_{кр}^{ик} < 740 \text{ kg/m}^3$ .

Таблица 2. Стойности на регресионните коефициенти на математическия модел за рационална плътност на ПКДЧ

Регресионни коефициенти	Стойности	Регресионни коефициенти	Стойности
$B_0$	694	$B_{23}$	15,3
$B_1$	114	$B_{24}$	9,4
$B_2$	49	$B_{34}$	15,7
$B_3$	37,5	$B_{11}$	-2,3
$B_4$	32	$B_{22}$	-4,3
$B_{12}$	9,9	$B_{33}$	5,66
$B_{13}$	8,7	$B_{44}$	2,8
$B_{14}$	6,1	-	-

Плътността на ПКДЧ е неравномерно разпределена както по напречното сечение (Йосифов и Михов 1988, Йосифов и Делин 2010, Kühne и Niemz 1980), така и в плоскостта на композитната плоча (Дончев, Йосифов и др. 1980). Изследванията в тази насока показват, че средната зона по напречното сечение и средата в плоскостта на плочата имат по-ниски плътности. Доказано е (Йосифов и Делин 2010), че неравномерната плътност на ПКДЧ е технологично предопределена от разликите в пиезотермическото третиране на дървесния килим по площ и напречно сечение. За определяне на максималната разлика в послойната плътност на ПКДЧ ( $\Delta\rho_{\max}$ ) при различни технологични условия е предложена съответна номограма (Йосифов 1989). При оптимални условия на производство  $\Delta\rho_{\max} = \rho_{\text{лс}} - \rho_{\text{мс}} = \rho_{\text{п}}^{0,72}$ , т.е. за плочи с плътност  $\rho_{\text{п}} = 700 \text{ kg/m}^3$ , се получава  $\Delta\rho_{\max} = 112 \text{ kg/m}^3$ .

### 3.3. РАЦИОНАЛНА СТРУКТУРА НА МОРФОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ПКДЧ

Основните градивни елементи на ПКДЧ са дървесни частици с определени размери и форма. Конструкционните (лицевите) слоеве обикновено са изградени от специално произведени плоски дървесни частици с форма близка до паралелепипедна с дължина  $\ell$ , ширина  $b$  и дебелина  $\delta$ . Строежът на плочите се

определя от разположението на дървесните частици в тях и по-точно в двете характерни сечения – успоредно и перпендикулярно на плоскостта им. За теорията и практиката от по-голямо значение е напречното сечение на плочите, тъй като при него по-добре са изразени връзките между отделните частици.

В сечението успоредно на плоскостта на плочите дървесните частици лежат предимно на плоската си страна, а надлъжните им оси (посоката на дървесните влакна) са слабо ориентирани по дължината на плочата – до 25 % (Derpe 1984, Йосифов и Делин 2010). В напречното си сечение ПКДЧ са изградени от интегрални слоеве от дървесни частици, лежащи на плоската си страна, което се отнася главно за конструкционните слоеве.

Доказано е, че деформационно-якостната характеристика на ПКДЧ зависи до голяма степен от разположението на частиците в структурата им, кохезионната якост, размерите и формата на частиците, а също от големината на адхезионните връзки между тях.

Сложният строеж на структурата на ПКДЧ не позволява да се изведат конкретни зависимости за съществуващите закономерности. Ето защо редица автори (Rakwitz 1963, Stofko 1960, Гамов 1969, Поташев и Лапшин 1978) са предложили опростени структурни модели на компо-

зитните плочи. Най-значими за теорията са моделите на Rakwitz и Stofko, които приемат, че структурата на плочата по напречното ѝ сечение е съставена от дървесни частици с правилна паралелепипедна форма, като при първия модел челните ръбове на частиците са отдалечени на разстояние  $d$ , а при втория те са плътно долепени. От тях са изведени зависимости: за първата моделна структура

$$\ell_1 > \delta \frac{\sigma_{оп}}{\sigma_c}, \text{ а при } d \ll \ell, \ell_1 \approx 1/2 \ell$$

или

$$\ell > 2\delta \frac{\sigma_{оп}}{\sigma_c}, \quad (11)$$

и за втората структура

$$h_c = h_n \left( 1 - \frac{\sigma_{оп} \cdot \delta}{\sigma_c \cdot \ell} \right), \quad (12)$$

където  $\ell_1$  е дължината на застъпване по лепилен слой;

$\sigma_{оп}$ ,  $\sigma_c$  – съответно напреженията на опън и срязване по лепилен слой;

$h_c$  – частта от дебелината на плочата, в която няма прекъсвания при кое да е напречно сечение.

За дължината от дървесни частици от твърди широколистни дървесни видове Гамов предлага емпиричната зависимост

$$\ell \geq \frac{5,7 \cdot \sigma_d'' \cdot \delta}{\sigma_c \cdot i}, \quad (13)$$

където  $i$  е коефициент, отчитащ влиянието на технологичните фактори ( $\rho_n$ ,  $\rho_d$ ,  $\rho_l$  и  $\rho_{лс}$ ).

Трябва да се отбележи, че изведените зависимости имат ориентируваща точност и са характерни главно за структурата на лицевите слоеве на плочите. Независимо от това от тях може да се направи извода, че дължината и дебелината на частиците са важен фактор за

формиране на деформационно-якостните свойства на ПКДЧ. При това отношението  $\ell_{лс}/\delta_{лс}$  оказва силно влияние върху якостната характеристика на плочите, като рационалната му стойност е от 40 до 70 (Йосифов 1989).

Върху якостните показатели на ПКДЧ оказва влияние, но по-слабо, широчинното отношение  $K_w = \ell/b = 6 \div 12$  [18, 23, 24]. От значение е също и критериалното отношение  $b/\delta$ , на което рационалната стойност е в границите от 4 до 6 (Йосифов 1989).

Дисперсният състав на дървесните частици оказва също съществено влияние върху якостта на огъване и якостта на разлепване (напречен опън) на ПКДЧ (Йосифов 1980, 1989). Като рационални стойности за дисперсията на частиците за лицевите слоеве на плочите се препоръчва  $\Phi_l = 1,25 \text{ mm}/0,60 \text{ mm}$ , а за междинния слой –  $\Phi_m = 2,5 \text{ mm}/1,25 \text{ mm}$ .

### ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ АНАЛИЗА ЗА РАЦИОНАЛНИ МАКРОСТРУКТУРНИ ПАРАМЕТРИ НА ПКДЧ

Установени са границите на вариране на рационалните стойности за състава на ПКДЧ в зависимост от качествените и икономическите им показатели: плътността на изходната дървесна суровина има важно значение за физико-механичните свойства на плочите, като лигноцелулозната суровина с по-ниска плътност е по-благоприятна; процентното участие на лицевите слоеве в общата дебелина на плочата трябва да бъде от 35 до 40 %; рационалното съдържание на свързващо вещество съответно в лицевите слоеве трябва да бъде  $10 \div 13$  %, а в междинния слой –  $8 \div 9$  %.

Изведено е регресионно уравнение за определяне на рационалната плътност

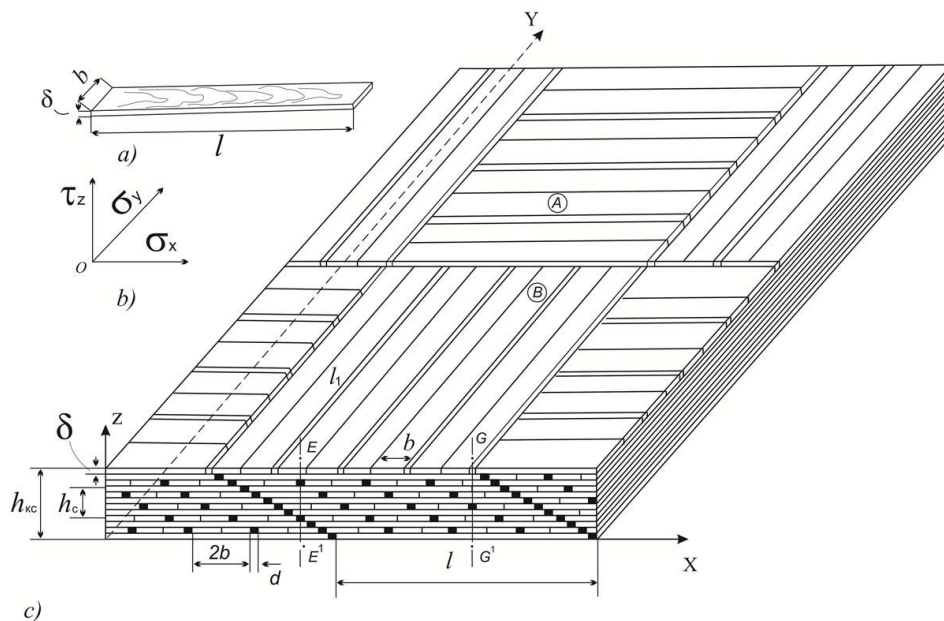
на ПКДЧ в зависимост от факторите:  $\rho_d^0$  – плътност на абсолютно сухата дървесина;  $M_d$  – процентно участие на лицевите слоеве в общата дебелина на плочата;  $p_{лс}$  – процентно съдържание на смола в лицевите слоеве на плочата;  $p_{мс}$  – процентно съдържание на смола в междинния слой на плочите.

Дадени са зависимости за определяне на рационалните размери на дървесните частици, с оглед гарантиране на якостно-деформационните показатели на ПКДЧ.

#### 4. ИДЕАЛИЗИРАН РАЦИОНАЛЕН МОДЕЛ НА МАКРОСТРУКТУРАТА НА КОНСТРУКЦИОННИТЕ СЛОЕВЕ НА ПКДЧ

На фиг. 3 в тримерна координатна система XYZ е представен елемент от идеализирания модел на макроструктура

на конструкционен слой на ПКДЧ с дебелина  $h_{п} = 16 \text{ mm}$ . Интегрираният конструкционен слой е изграден от дървесни частици, в мащаб 4:1, с паралелепипедна форма с технологично зададени рационални размери  $l = 14 \text{ mm}$ ,  $b = 1,5 \text{ mm}$  и  $\delta = 0,25 \text{ mm}$ . Сумарната дебелина на конструкционния слой  $h_{кс} = 3 \text{ mm}$  е формирана от дебелините на 12 елементарни слоеве с дебелина  $\delta$ , ориентирани по оста Z. Плоскостта на плочестия композит (X–Y) е съставена от карета, всяко с дължина на страната  $l$  или  $4(b+d)$ , т.е. всяко каре се състои от четири чифта (двойки) дървесни частици с междинни пространства между тях  $d = 1,25 \delta = b = 1,25 \text{ mm}$ . В модела не е отчетена дебелината на лепилните слоеве, която е под  $0,03 \text{ mm}$  и е трудно да се представи в разглеждания мащаб.



Фиг. 3. Моделна структура на лицевия слой на трислойна ПКДЧ

В моделната структура на конструкционния слой са спазени условията за рационалност на морфологичните им параметри. Геометричната структура за разположение на каретата частица с ориентираност на надлъжните оси на дървесните влакна на частиците кръстосано на  $90^\circ$  позволява да се гарантират еднак-

ви якостни показатели на плочите и в двете посоки на плоскостта им X–Y. Макропоровото пространство, т.е. технологично формираното, се състои от празнините между надлъжните и челните страни на сечението. Процентното участие на лицевите слоеве от общата дебелина на плочата е 37,5%. Застъпването по

лепилен слой между двойките частици по напречното сечение на конструкционния слой е  $\ell_1 = \ell - d = 12,75 \text{ mm}$ , т.е. 91%, което е близко до максимално възможно. Частта от дебелината на конструкционния слой, в която няма прекъсвания по произволни сечения (в случая  $EE^1$  и  $GG^1$ )  $h_c = 5 \delta = 1,25 \text{ mm}$ , т.е. 41,6%.

В резултат на изследванията на редица автори [13, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 и др.] е установено и в практиката са потвърдени следните препоръчителни средни стойности на структурно-морфологичните отношения:  $k_v = 56$ ;  $k_w = 9,3$  и  $k_b = 6$ . Тези стойности на критичните отношения могат да се приемат като рационални.

От горното следва, че предложеният рационален идеализиран модел на конструкционните слоеве на ПКДЧ напълно отговаря на условията като основа за теоретични изследвания и извеждане на зависимости за определяне на рационалната геометрия на макроструктурните им параметри.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установени са рационалните стойности на маркоструктурните параметри на ПКДЧ и тяхното влияние върху качествените и икономическите им показатели.

Установена е връзката между деформационни напрежения при дълготрайно натоварване на огъване при експлоатационни условия и деформационно якостните показатели на ПКДЧ.

Доказано е, че с достатъчна точност за инженерната практика може да се използва показателят якост на огъване на ПКДЧ като оценъчен критерий за якостно-деформационните им свойства при натоварване на огъване в експлоатационни условия. Изведена е емпирична зависимост за определяне на якостта на огъ-

ване в зависимост от структурно-технологичните фактори.

Доказано е, че деформационно-якостната характеристика на ПКДЧ се определя главно от макроструктурните параметри на конструкционните им слоеве и големината на кохезионните и адхезионните сили на сцепление в тях.

Предложен е идеализиран модел на рационална макроструктура на конструкционен слой на ПКДЧ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисова А. П. 1972. Число контактов между частицами в древесностружечной плите. Сб. Технология деревообработки, Красноярск.
2. Бехта П. 1988. Теоретични аспекти на структурообразуването на плочите от дървесни частици. НТК „Пресови материали от дървесина“, ВЛТИ, София.
3. Гамов В. В. 1968. Экспериментально-теоретическое исследование структурно-механического упрочнения древесностружечных плит. Автореф., Москва.
4. Енчев Е. 1984. Дървеснознание. София.
5. Йосифов Н. 1980. Влияние на фракционния състав на дървесните частици върху якостните показатели на плочите. Сб. Науч. тр. ВЛТИ, сер. МТД, т. XXV.
6. Йосифов Н. 1981. Изследване върху зависимостта на модула на линейна деформация при огъване от плътността на различни видове промишлено произведени плочи от дървесни частици. Сб. 30 год. МТД, София.
7. Йосифов Н. 1984. Оптимизиране на плътността на плочите от дървесни частици. Балканска НТК, София.
8. Йосифов Н. 1987. Влияние на технологичните фактори върху плътността на плочите от дървесни частици. НТК „Пресови материали от дървесина“, В. Търново.
9. Йосифов Н. 1986. Принос към метода за определяне на пористостта на плочите от дървесни частици. Науч. тр. ВЛТИ, сер. МТД, София.
10. Йосифов Н. 1988. Оптимизиране на технологичните фактори, оказващи влияние върху физико-механичните свойства на ПДЧ. НТК „Материали и технологии за мебели“, Ст. Загора.
11. Йосифов Н. 1989. Теоретико-експериментални изследвания върху структурната характе-

- ристика и прогнозирането на качествените показатели на плочите от дървесни частици. Автореферат на дисертация ДТН, София.
12. Йосифов Н. 1990. Изследване върху максималната разлика в послойната плътност на плочите от дървесни частици. Науч. тр. на ВЛТИ, сер. МТД, София.
  13. Йосифов Н., Делин Ст. 2010. Структурно моделиране на плочестите композити от дървесни частици. Сб. 3-та НТК „Иновации в горската промишленост и инженерния дизайн“, София.
  14. Кючуков Г., Йосифов Н. 1966. Върху якостта на огъване и модула на еластичност при огъване на произвежданите у нас плочи от дървесни частици. Науч. тр. на ВЛТИ, сер. МТД, София.
  15. Поташев О.Е., Лапшин Ю. Г. 1982. Механика древесных плит. Москва.
  16. Уголев Б. Н. 1965. Испитания дресесины и дресесных материалов. Москва.
  17. Deppe H. J. 1989. Tehnologie der Spanplatten. Stuttgart.
  18. Hänsel A., Niemz P. 1989. Struktur und Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Dresden.
  19. Keylwert R. 1958. Zur Mechanik mehrschichtiger Spanplatten. Berlin.
  20. Kollmann F. 1967. Verformung und Bruchgeschehen bei Holz als einem anisotropen, inhomogenen, prigen. Düsseldorf.
  21. Küne G., Niemz P. 1980. Untersuchungen zur Struktur von Spanplatten. Leipzig.
  22. Maloney T. M. 1977. Modern particle board and dry processing fiberboard manufacturing. California.
  23. Rackwitz G. 1963. Einfluß der Spanabmessungen auf die Eigenschaften von Spanplatten. Berlin.
  24. Stofko J. 1960. Zavislost machanickykh vlastnosti drevotrieskovej hmoti od geometrickykh rozmerov triesky. Bratislava.

## RATIONALIZED MACROSTRUCTURE OF WOOD PARTICLE BASED COMPOSITES

Nikolay Yosifov<sup>1</sup>, Stefan Delin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Forestry – Sofia, nikyosif@mail.bg

<sup>2</sup>L.A. – USA, deltica@aol.com

### ABSTRACT

Subject of the study is the macrostructure of wood particle based composites (WPBC) and the possible rationalization of their significant structural parameters with the goal of increasing the effectiveness of material's use in the design practice.

The physical nature of the WPBC can be defined as an anisotropic layered wood-polymeric material, fabricated from adhesively bonded wood particles. The macrostructure characteristics and the physical and mechanical properties of the composite material predetermine it's broad application in the furniture production.

The rationalized macro structural characteristic of the WPBC is established on the basis of theoretical and experimental studies determining the effective dimensions and dispersion of the wood particles. Structural deformation and strength models are developed and analyzed for short and long-term loading.

The impact of the major structural parameters on the complex qualitative indicator of WPBC is defined using mathematical regression modeling.

**Key words:** wood particle based composites, model, macrostructure, density, structural formulating parameter, adhesion, bonding layer, complex qualitative indicator.