



Попов Анатолий Михайлович родился в 1951 г. в г. Новосибирске. В 1973 г. окончил физико-технический факультет Новосибирского электротехнического института. Академик РАТ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика» СГУПС.

Область научных интересов — экспериментальные методы механики деформируемого тела. Автор более 90 научных трудов.

E-mail: teormech@stu.ru



Зиновьев Владимир Борисович родился в 1952 г. в г. Минусинске Красноярского края. В 1974 г. окончил физико-технический факультет Новосибирского электротехнического института. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» СГУПС.

Область научных интересов — экспериментальные методы механики деформируемого тела. Автор более 50 научных трудов.

E-mail: teormech@stu.ru



Ким Леонид Ильич родился в 1944 г. в с. Алгазы Бурлетенского района Алмаатинской области. В 1968 г. окончил механико-математический факультет Новосибирского государственного университета. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» СГУПС.

Область научных интересов — экспериментальные методы механики деформируемого тела. Автор более 40 научных трудов.

E-mail: teormech@stu.ru



Сподарева Любовь Анатольевна родилась в 1952 г. в г. Усть-Каменогорске. В 1974 г. окончила факультет «Мосты и тоннели» Новосибирского института инженеров железнодорожного транспорта. Кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая механика» СГУПС.

Область научных интересов — движение сыпучих сред. Автор более 30 научных трудов.

E-mail: teormech@stu.ru

УДК 624.011

А.М. ПОПОВ, В.Б. ЗИНОВЬЕВ, Л.И. КИМ, Л.А. СПОДАРЕВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ НАГЕЛЯМИ В ДРЕВЕСИНЕ

В работе предлагается методика определения допустимого расстояния между винтовыми нагелями крестообразного сечения, забитыми в древесину, основанная на экспоненциальной аппроксимации сдвиговых деформаций. Для определения деформаций использовался метод голографической интерферометрии во встречных пучках.

Ключевые слова: *нагель, древесина, напряженно-деформированное состояние, метод голографической интерферометрии, лазер, перемещение, деформации, расстановка нагелей.*

Винтовые нагели крестообразного сечения при изготовлении или ремонте деревянных конструкций до настоящего времени не применялись. По этой причине оказался нерешенным вопрос об их расстановке в узловых соединениях деревянных конструкций. При нагружении нагеля вокруг нагельного гнезда возникает сложное напряженно-деформированное состояние. В случае забивки нескольких нагелей в деревянный элемент неоднородности полей напряжений могут перекрываться, существенно увеличивая опасность разрушения соединения. Оценить величину поля возмущения можно экспериментально.

Среди различных экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния выгодно отличаются методы, основанные на голографическом способе записи информации, прежде всего метод голографической интерферометрии во встречных пучках в две экспозиции. Это обусловлено тем, что он позволяет проводить исследования любых объектов, изготовленных из натуральных материалов с минимальной виброзащитой изделия.

В работе [1] получены уравнения для интерпретации интерференционных полос, наблюдаемых в отраженном свете, голограммой, записанной в две экспозиции:

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 + \cos \gamma) = N\lambda, \quad (1)$$

а для оптических картин, наблюдаемых на просвет, уравнение

$$\begin{aligned} & [U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 + \cos \gamma)] - \\ & - [U_D \cos \alpha_R + V_D \cos \beta_R + W_D (1 + \cos \gamma_R)] = N\lambda. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) искомыми величинами являются компоненты U , V и W вектора перемещения. Направляющие углы наблюдения α , β , γ задаются экспериментатором при выборе направления наблюдения за точкой объекта, а направляющие углы вектора рассеянного света α_R , β_R и γ_R определяются параметрами индикатриссы рассеивания материала поверхности изделия и геометрической формой этой поверхности на участке формирования опорного пучка; N — порядок интерференционных полос, определяемый в эксперименте.

При исследовании инженерных конструкций чаще всего приходится иметь дело с плоскими участками поверхности или с участками, кривизной которых можно пренебречь. В этом случае $\alpha_R = 90^\circ$, $\beta_R = 90^\circ$ и $\gamma_R = 0$ уравнение (2) принимает вид:

$$U_B \cos \alpha + V_B \cos \beta + W_B (1 + \cos \gamma) - 2W_D = N\lambda. \quad (3)$$

Для раздельного определения компонент вектора по картинам интерференционных полос, наблюдаемых в отраженном голограммой свете, обычно регистрируют картины полос, наблюдаемых с симметричных относительно нормали к регистрирующей среде направлений. Если направления наблюдений лежат в плоскости xoz , то разрешающие принимают вид:

$$\begin{aligned} & U_B \sin \gamma + W_B (1 + \cos \gamma) = N_1 \lambda. \\ & -U_B \sin \gamma + W_B (1 + \cos \gamma) = N_2 \lambda. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь N_1 и N_2 — порядки интерференционных полос в картинах, наблюдаемых с симметричных направлений. Компонента вектора перемещения, лежащая в плоскости регистрации, определяется выражением

$$U_B = \frac{(N_1 - N_2)\lambda}{2 \sin \gamma}. \quad (5)$$

Определение перемещений в плоскости изделия по картинам полос, наблюдаемым в проходящем через голограмму свете, возможно только при отсутствии зазора между объектом и регистрирующей средой или малых углах наблюдения. В последнем случае, как в методе муара или спекла, считают, что положение полос зависит только от перемещения в плоскости.

Поверхность древесины обладает недостаточной отражательной способностью, поэтому для создания отражающего слоя на поверхность деревянного бруса с помощью эпоксидного клея наносился слой алюминиевой пудры. Методика создания отражающего слоя следующая. Предварительно на поверхность бруса наносится тонкий слой эпоксидного клея. Затем на клеевой слой равномерно напыляется алюминиевая пудра. После затвердевания клея (24 ч) остатки пудры тщательно удаляются с помощью марлевого тампона, пропитанного ацетоном. Далее у поверхности закрепляют высоко-разрешающую среду (фотопластинку ПФГ-3М). Наилучшие результаты были получены при закреплении фотопластинки с помощью двух полосок стеклянных пластинок толщиной 1,4 мм и шириной 6–8 мм, приклеенных с помощью полиуретанового клея «Момент гель» к поверхности бруса и к краям фотопластинки, направленным вдоль волокон древесины. Фотопластинка крепилась эмульсией к образцу. Попытки приклеить фотопластинку с помощью промежуточной оптической неактивной среды привели к тому, что при тонком слое промежуточной среды при забивании нагеля из-за больших нормальных перемещений происходит отрыв фотопластинки. В случае толстой промежуточной среды, изготовленной из желатина, происходит деполяризация отраженного света, что приводит к резкому ухудшению качества голограмм.

В массив древесины, с помощью пресса ДМ–30М, вблизи фотопластинки вдавливался нагель и образец выдерживался в течение 1,5–2 ч, чтобы прекратилась ползучесть материала древесины. Затем производилась первая экспозиция. Нагель нагружался с помощью пресса ДМ–30М и производилась вторая экспозиция. Голограмма проявлялась в разбавленном проявителе Петрова. Фотопластинка тщательно промывалась в проточной воде и сушилась естественным образом. Полученная голограмма восстанавливалась. При этом голограмма освещалась коллимированным пучком белого света и фотографировались картины полос, наблюдаемые в отраженном голограммой свете. В качестве источника света применялся диапроектор «Ленинград». На рис. 1 и 2 приведены фотографии интерферограмм.

Деформации древесины, вызванные усилиями, передаваемыми нагелям, можно представить как сумму деформаций от равномерно распределенной нагрузки и от самоуравновешенной нагрузки, характеризующей неоднородность деформированного состояния, обусловленной локальностью приложения нагрузки. При расчете нагельных соединений расстояние между нагелями следует выбирать таким, чтобы неоднородности деформированных состояний, вызванные разными нагелями, не перекрывались.

Неоднородность деформированного состояния может характеризоваться изменением сдвиговой деформации. Для того чтобы определить закон изменения сдвиговой деформации, строились эпюры порядков полос вдоль одних и тех же сечений на картинах полос, зарегистрированных с симметричных относительно нормали направлений, для каждой голограммы.

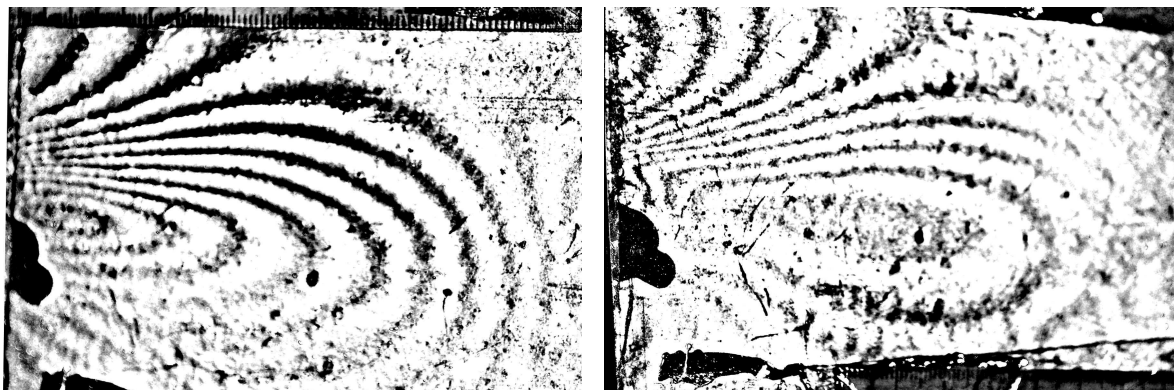


Рис. 1. Фотографии интерферограмм. Нагель 14 мм. Нагрузка 400 Н

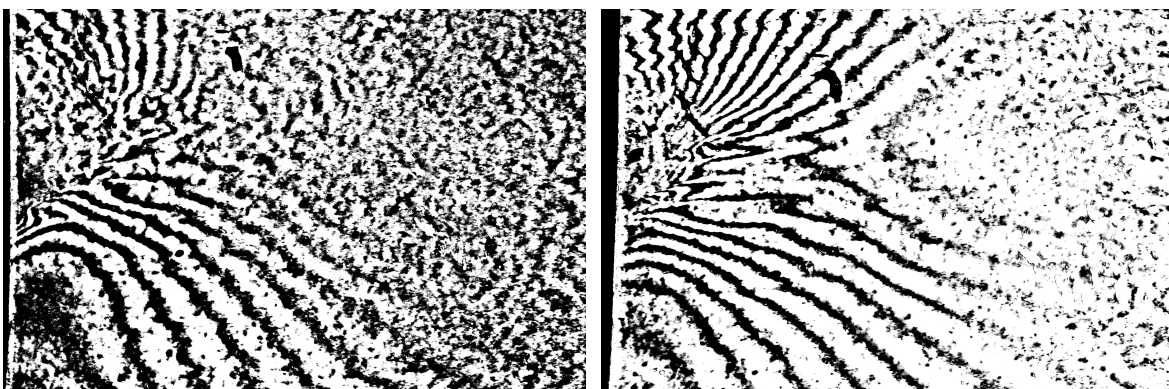


Рис. 2. Фотографии интерферограмм. Нагель 16 мм. Нагрузка 1 000 Н

Направление сечений совпадает с направлением волокон древесины. Для каждой голограммы строились эпюры порядков полос в двух или трех сечениях. Затем вычислялись разности порядков полос в одних и тех же точках сечений для картин полос, наблюдаемых с симметричных направлений. На рис. 3–5 приведены эпюры распределения разностей порядков интерференционных полос. На всех рисунках эпюра 1 построена вдоль сечения древесины, ближайшего к пластине нагеля, по прямой, параллельной волокнам древесины. На рис. 3 эпюры 2, 3 построены в сечениях, параллельных сечению 1 и отстоящих от него на 6 мм, эпюра 2 во внешнюю относительно нагеля сторону, эпюра 3 — во внутреннюю. Дальнейшие исследования показали, что наибольшие значения постоянной затухания получаются при обработке сечений 1 и 3, в остальных случаях обрабатывались эти сечения.

Как следует из (5), кривые, представленные на рис. 3–5, пропорциональны компоненте вектора перемещений U , совпадающей с направлением волокон древесины.

Коэффициент пропорциональности, цена полосы, равен $\frac{\lambda}{\sin \gamma}$. В случае линейной аппроксимации распределения компоненты U компонента сдвиговой деформации может быть определена соотношением

$$\frac{dU}{dy} = \frac{\Delta N}{h} \frac{\lambda}{\sin \gamma}. \quad (6)$$

Здесь ΔN — разность величин $\frac{N_1 - N_2}{2}$, определенная в точках с одинаковой координатой x в разных сечениях; h — расстояние между сечениями.

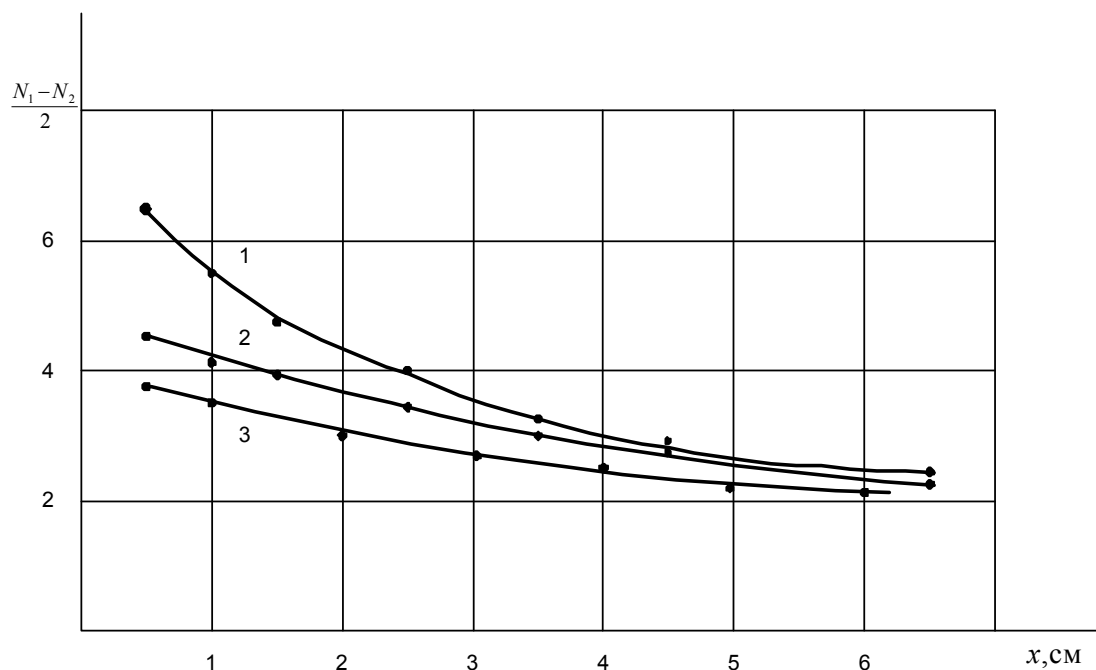


Рис. 3. Эпюры $\frac{N_1 - N_2}{2}$ вдоль сечений, параллельных волокнам древесины, вблизи нагеля 12 мм, нагруженного усилием 600 Н

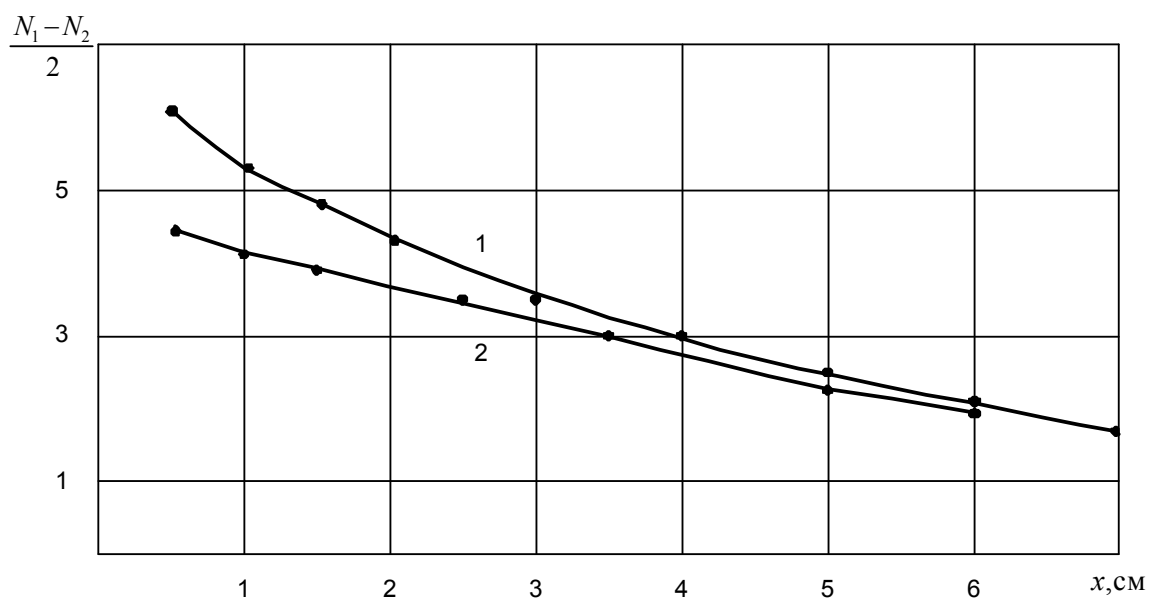


Рис. 4. Эпюры $\frac{N_1 - N_2}{2}$ вдоль сечений, параллельных волокнам древесины, вблизи нагеля 12 мм, нагруженного усилием 400 Н

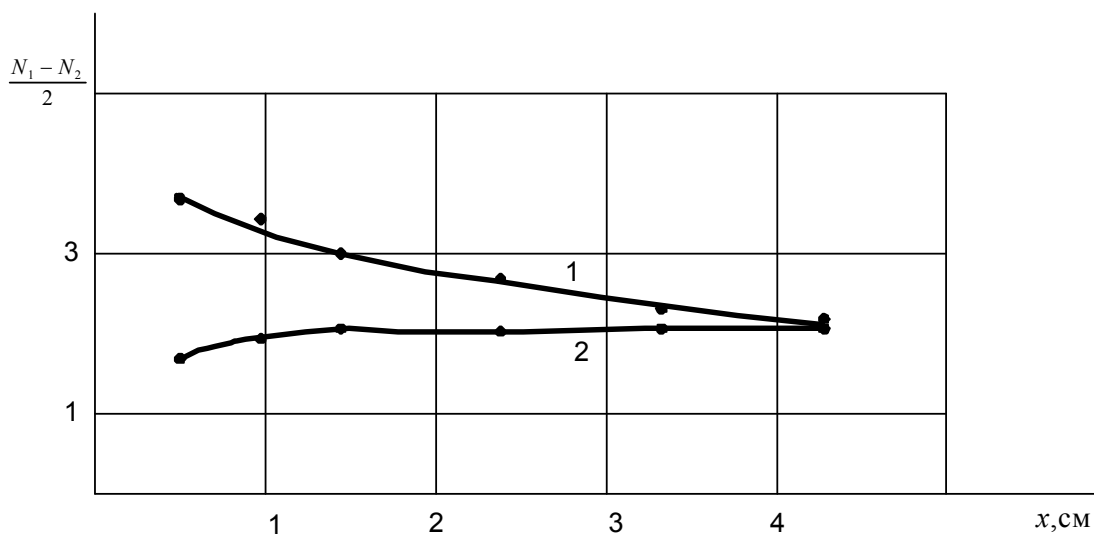


Рис. 5. Эпюры $\frac{N_1 - N_2}{2}$ вдоль сечений, параллельных волокнам древесины, вблизи нагеля 16 мм, нагруженного усилием 1000 Н

Ранее отмечалось, что затухание возмущения, вызванного приложением самоуравновешенной нагрузки, носит экспоненциальный характер [2, 3]. Поэтому можно предположить, что сдвиговая деформация dU/dy описывается выражением

$$\frac{dU}{dy} = Ce^{\frac{x}{\tau}}. \quad (7)$$

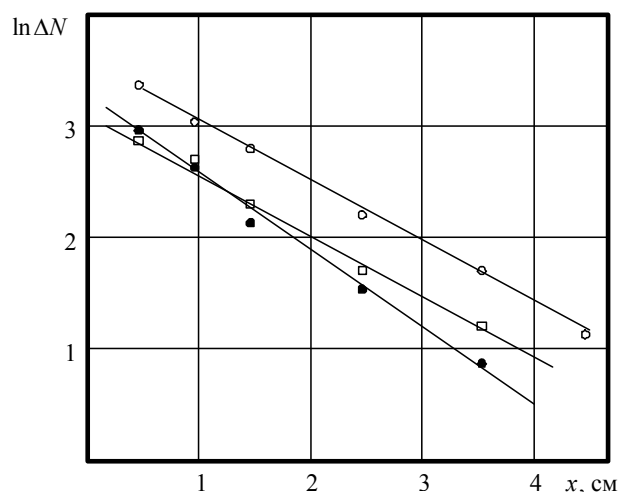
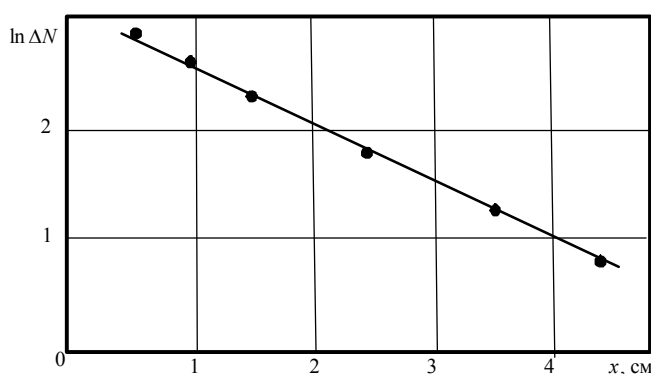
Тогда

$$\ln \frac{dU}{dY} = \ln c - \frac{x}{\tau} = \ln \Delta N + \ln \frac{\lambda}{h \sin \gamma}. \quad (8)$$

Отсюда следует, что за постоянную затухания возмущения τ можно принять расстояние, на котором величина $\ln \Delta N$ уменьшается на единицу.

На рис. 6 и 7 приведены графики изменения $\ln \Delta N$ вдоль волокон древесины вблизи нагелей. На рис. 6 кружочки соответствуют данным, полученным при обработке рис. 3, темные для сечений 1 и 2 и светлые для сечений 1 и 3. Как видно из рисунков, полученные данные хорошо ложатся на прямые, что подтверждает предположение об экспоненциальной зависимости деформаций. По построенным прямым можно определить постоянные затухания. Они оказались равными 1,4 см по данным, полученным при обработке сечений 1, 2, и 1,75 см — для сечений 1 и 3. При нагружении нагеля 12 мм усилием 400 Н постоянная затухания равняется 1,80 см. Для нагеля 19 мм постоянная затухания 1,95 см.

Чтобы исключить раскалывание деревянного элемента при нагружении нагелей, расстояние между нагелями следует принимать таким, чтобы в области наложения напряжений, обусловленных забивкой двух соседних нагелей, величина каждого из напряжений снижалась до 2 % от максимальной величины, т.е. 8τ . Таким образом, для нагелей с характерным размером 12 мм рекомендуется принять расстояние между нагелями 14,4 см, а для нагелей 16 мм — 15,6 см.

Рис. 6. Графики изменения $\ln \Delta N$ вдоль сечений в древесине вблизи нагеля 14 ммРис. 7. График изменения $\ln \Delta N$ вдоль сечений в древесине вблизи нагеля 16 мм

Для сравнения: при оценке глубины проникновения краевого эффекта для композитных материалов применяют формулу [4]

$$L = h \sqrt{\frac{E_a}{E_t}}. \quad (9)$$

Здесь L — глубина зоны краевого эффекта; h — ширина зоны возмущения; E_a и E_t — модули упругости материала в направлении распространения возмущения и по нормали к нему соответственно. Нагель с характерным размером 12 мм был забит в доску вдоль радиального направления, поэтому E_a — продольный модуль упругости; E_t — тангенциальный модуль упругости. Для сосны $E_a = 16,6$ ГПа, $E_t = 0,542$ ГПа и $L = 6,64$ см, следовательно, расстояние между нагелями следует принять равным $2L = 13,3$ см. Нагель с характерным размером 16 мм был внедрен в брус вдоль тангенциального направления, поэтому E_a — продольный модуль упругости; E_t — радиальный модуль упругости, для сосны $E_R = 1,124$ ГПа. Тогда $L = 6,15$ см и расстояние между нагелями 12,3 см. Исходя из выше сказанного, можно рекомендовать расстояние между нагелями вдоль волокон равным $12d$ при забивании нагеля в радиальном направлении и $10d$ при забивании в тангенциальном направлении, где d — характерный размер нагеля.

Библиографический список

1. Жилкин В.А., Зиновьев В.Б. Расшифровка интерференционных картин в методе голографического муара // Журнал технической физики. 1986. Т. 56. № 1. С. 113–119.
2. Жилкин В.А., Зиновьев В.Б. Определение зоны краевого эффекта с помощью метода голографического муара // Журнал прикладной механики и технической физики. 1986. № 5. С. 132–135.
3. Зиновьев В.Б., Шведов В.Н., Попов А.М. О расстановке нагелей крестообразного сечения в соединениях деревянных элементов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 2012. № 3. С. 127–131.
4. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига, 1980. 571 с.

A.M. Popov, V.B. Zinoviev, L.I. Kim, L.A. Spodareva. Experimental Determination of Allowable Distances between Dowels in Dowel Wood.

In the work the methodology of determination of allowable distance between helical dowels of cross-section, driven in wood, based on exponential approximation of shift deformations is proposed. The method of holographic interferometry in cross-counter rays was used for deformation determination.

Key words: *dowel, wood, deflected mode, method of holographic interferometry, laser, shift, deformation, dowels distribution.*