

*С. И. Кузьмин*

## ТЕОРИЯ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ РЕЗАНИИ ДРЕВЕСИНЫ ВДОЛЬ ВОЛОКОН

### История развития теории резания древесины

Основоположником науки о резании древесины так же, как и науки о резании металлов, является русский учёный — горный инженер И. А. Тиме.

В связи с «волокнистой структурой» древесины, что влечет анизотропию всех механических свойств её, И. А. Тиме различал три главнейших случая резания, а именно:

- а) в торец волокон;
- б) по направлению волокон;
- в) поперёк волокон.

В каждом из этих трёх случаев резания образование элементов стружки происходит своим специфическим путём.

При продольном резании И. А. Тиме различал три периода в образовании каждого элемента:

1. Остриё резца постепенно проникает вглубь древесного бруска, при этом сила сопротивления постепенно возрастает от 0 кг до  $P$  макс. кг, при которой сразу происходит отделение элемента стружки на всю его длину.

2. При дальнейшем продвижении резца происходит постепенное сгибание элемента и продолжение разрыва в плоскости волокон. Это длится до тех пор, пока угол отгиба достигнет  $15-20^\circ$ , после этого элемент надламывается.

3. В дальнейшем резец продвигается вперёд, отгибая надломленный элемент стружки почти без всякого сопротивления до того момента, пока передняя грань резца вновь начнёт внедряться в древесину для образования нового элемента стружки, после чего процесс повторяется.

Результаты своего экспериментального исследования И. А. Тиме опубликовал в 1870 году, и с тех пор вплоть до 1934 года все работы, в которых излагалась обработка древесины резанием, базировались на результатах, опубликованных в труде «Сопротивление металлов и дерева резанию».

Профессор М. А. Дешевой в своём капитальном труде «Механическая технология дерева» в качестве критерия правильности полученных им аналитическим путём зависимостей между усилием резания и механическими свойствами древесины применяет всё те же экспериментальные данные, которые получил И. А. Тиме на 60 лет раньше.

Успехи физических и математических наук подготовили почву для создания более углублённой теории резания древесины. Законченная в 1940 году в ЦНИИМЭ работа «Теоретическое и экспериментальное исследование по резанию, колке древесины и сцеплению её с подающими органами» даёт обширный материал для углубления наших представлений о протекании процесса раскалывания древесины, который и есть основное явление в процессе образования отдельных элементов стружки. В 1941 году кандидат технических наук, доцент С. А. Воскресенский написал работу «Новые исследования резания вдоль волокон», опубликованную только в 1950 году.

В этой работе автор рассматривает отделяемую резцом часть древесины — стружку, как балку, лежащую на упругом основании, изгиб которой заканчивается её изломом.

В результате изучения вышеназванных работ можно с уверенностью констатировать следующие основные положения, легшие в основу настоящего исследования.

1. Силы сопротивления, испытываемые резцом со стороны древесины, являются векторной суммой нормальных сил давления и связанных с ними сил трения на гранях резца: на передней—со стороны стружки, на задней—со стороны обрабатываемого бруса.

2. В случае продольного резания, поведение удаляемой части древесины — стружки—аналогично поведению балки, лежащей на упругом основании, если толщина её настолько превосходит поперечные размеры анатомических элементов древесины, что сечение можно считать сплошным. В этом случае сопротивление стружки движущемуся резцу может быть определено аналитически, в зависимости от геометрии резца и механических свойств обрабатываемого материала, при условии применения теории балки, лежащей на упругом основании.

### Физико-механические свойства древесины

Древесина, с точки зрения прочности, представляет собой агломерат, составленный из прочно спаянных между собою микроскопических трубчатых телец — клеток. Носителем прочностных свойств древесины служат стенки этих микроскопических трубчатых телец, имеющих, чаще всего, веретенообразную форму.

Можно представить механическую модель древесины, состоящую из большого количества трубок, стенки которых прочно спаяны между собой; трубки с более прочными (утолщёнными) стенками расположены слоями (аналогично поздней древесине годичного слоя), пронизанными в перпендикулярном направлении отдельными группами клеток (имитирующими сердцевинные лучи). Геометрические соотношения в элементах такой модели должны быть различными для различных пород древесины, в связи с чем и прочностные свойства данной модели будут различными в разных направлениях. Модель приобретает ортотропность механических свойств, столь характерную для древесины.

При действии сил в направлении волокон, волокна древесины оказывают наибольшее сопротивление, при растяжении большее, чем при сжатии.

При действии сил в направлении, перпендикулярном к волокнам, древесина оказывает сопротивление, в десятки раз меньшее, чем в продольном направлении. Особенности строения различных пород древесины в годичных слоях и мощности сердцевинных лучей отражаются в величине сопротивления древесины в радиальном и тангенциальном направлениях.

Сопротивление древесины действию касательных напряжений наибольшее в плоскости, перпендикулярной направлению волокон, и наименьшее в плоскости волокон. В последнем случае, если направление действия силы совпадает с направлением волокон, разрушение также совпадает с ним. Плоскость разрушения может отклоняться от направления волокон на величину диаметра волокна на его длине.

Волокнистое строение древесины в большой мере предопределяет плоскость разрушения её. При действии в такой плоскости одновременно нормальных и касательных напряжений в области положительных напряжений (растяжение поперёк волокон) считаем, что разрушение произойдёт, когда величина  $R$  в процессе своего роста достигнет значения единицы

$$R = \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{впр}}} \right)^2 + \left( \frac{\tau}{\tau_{\text{впр}}} \right)^2 = 1. \quad (2,1)$$

Опыты, проведенные в данном направлении ХАИ, в достаточной мере подтверждают приведенное соотношение.

Ввиду быстроты протекания процесса резания и связанного с ним нарастания усилий и напряжений, можно считать древесину абсолютно упругой вплоть до момента разрушения.

Скорость распространения деформаций в древесине, равная скорости распространения звука, благодаря её анизотропии различна в разных направлениях и для разных типов деформаций (колебаний) составляет:

	для продольных колебаний	для поперечных колебаний
для сосны	не менее 970 м/сек	не менее 475 м/сек
для бука	не менее 1560 м/сек	не менее 870 м/сек.

При изгибе деревянной балки сплошного сечения до её разрушения гипотеза плоских сечений может быть справедливой лишь до того момента, когда максимальное нормальное напряжение сжатия от изгиба достигнет величины временного сопротивления древесины на сжатие.

После этого напряжения в сжатых волокнах перестают повышаться и происходит перераспределение нормальных напряжений. Наличие сжимающей силы  $P$  усугубляет это явление.

На рис. 1 дано распределение нормальных напряжений по высоте сечения балки, подвергающейся изгибу. На рис. 1 (а) показан случай, когда  $\sigma_{из}$  меньше  $\sigma_{б сж}$ . На рис. 1 (б) показан случай перераспределения напряжений при дальнейшем увеличении изгибающего момента  $M$  и сжимающей силы  $P$ . (Пунктиром дано распределение напряжений в случае отсутствия сжимающей силы  $P$ ).

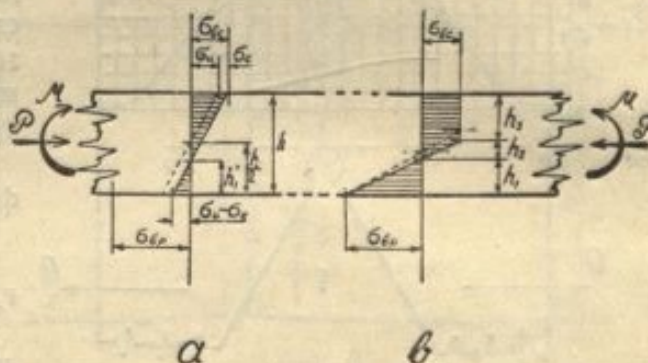


Рис. 1.

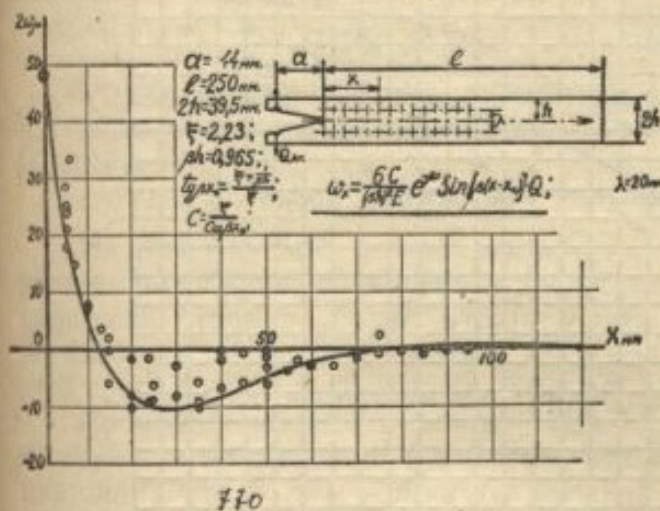


Рис. 2.

### Стружка-балка на упругом основании

Опыты, проведенные в ЦНИИМЭ, а также наши опыты по раскалыванию симметричных образцов (см. рис. 2) показывают следующее распределение относительных удлинений, а следовательно, и нормальных растягивающих (поперёк волокон) напряжений в плоскости раскалывания и в перпендикулярной ей плоскости поперечного сечения раскалываемого бруса. На рис. 2 показано распределение

деформаций в плоскости раскалывания, оно может быть выражено формулой:

$$\omega_x = \frac{6C}{(\beta h)^2 E} e^{-\beta x} \sin [\beta (x - x_0)] Q. \quad (3.1)$$

На рис. 3 даны экспериментальные точки, замеренные тензометром Гунгенбергера с базой  $\lambda = 20$  мм, значений поперечной деформации, аппроксимированные пунктирной линией; сплошная линия даёт значения относительной деформации, или напряжения, «в точке». Как видно, они с достаточной точностью выражаются формулой:

$$\frac{\epsilon_y}{\epsilon_{y\max}} = \frac{\sigma_y}{\sigma_{y\max}} = \left[ 1 - 3 \left( \frac{y}{h} \right)^2 + 2 \left( \frac{y}{h} \right)^3 \right] \quad (3,2)$$

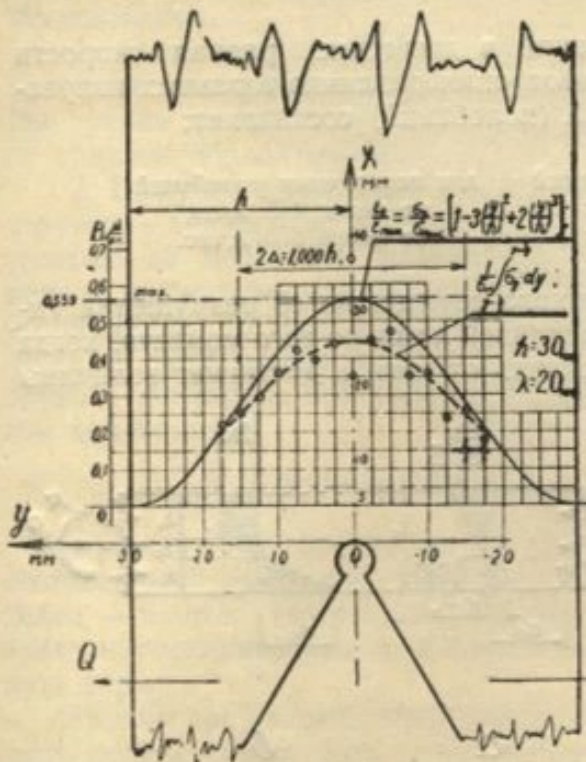


Рис. 3.

Опыты, произведенные Н. А. Дмитриевой в институте строительной механики АН УССР по изучению распределения напряжений в плоскости скалывания древесины, дают экспериментальные значения для общей силы сопротивления скалыванию, показанные на рис. 4 точками. Пунктиром дана аппроксимация искомого закона Н. А. Дмитриевой.

Сплошная линия выражает формулу:

$$P_0 = \tau_0 h \frac{th a_1 l}{a_1 l}, \quad (3,3)$$

где:

$$\tau_0 = 117,5 \text{ кг/см}^2$$

$$\text{и } a_1 h = ah \sqrt{1 + \frac{h_1}{h_2}} = 0,172.$$

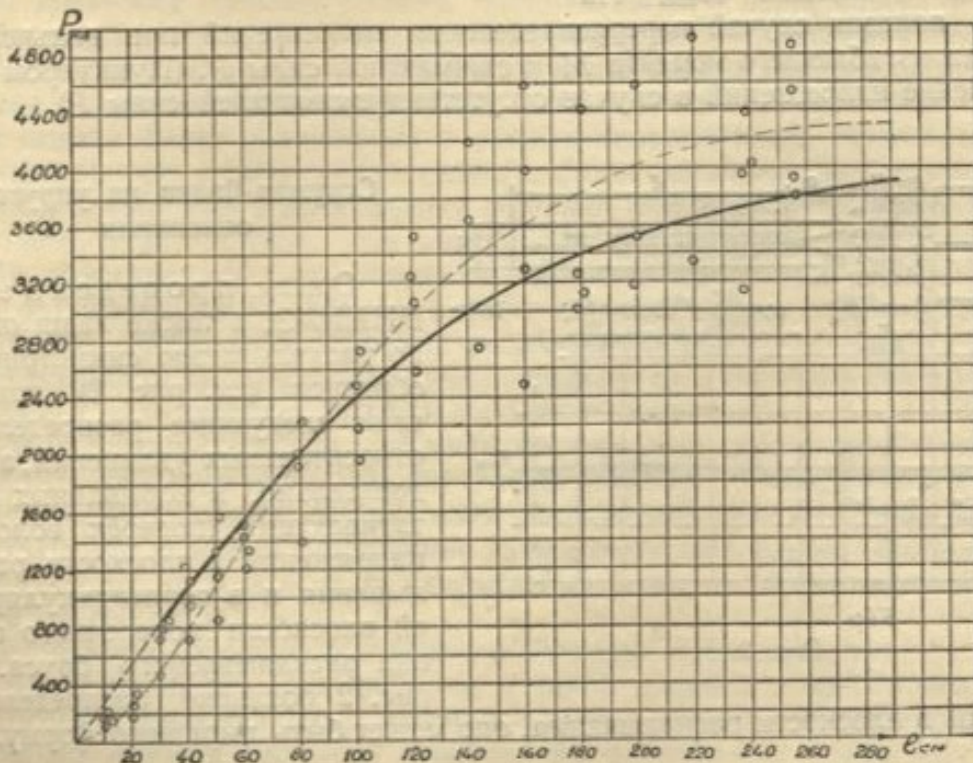


Рис. 4.

Наши опыты с откалыванием несимметричной части бруса показали значительное уменьшение жёсткости основания по сравнению со случаем раска-

львания симметричного бруса. Распределение напряжений в плоскости поперечного сечения показано на рис. 5.

Для расчётов удобно представить всю деформацию заключённой в некотором гипотетическом упругом слое  $\Delta$ , по всей толщине которого величина относительной деформации одинакова и равна максимальному значению (то же относится и к напряжениям).

Толщина такого упругого слоя может быть неодинаковой в случае действия нормальных или касательных напряжений, поэтому обозначим их  $\Delta_1$  — для нормальных и  $\Delta$  — для тангенциальных напряжений.

В таком случае коэффициент жёсткости постели может быть выражен чрезвычайно просто через модуль упругости и толщину нашего гипотетического упругого слоя. Так:

$K_1 = \frac{E\nu}{\Delta_1}$  есть коэффициент жёсткости постели при действии нормальных напряжений поперёк волокон.

$K_2 = \frac{G_1}{\Delta}$  есть коэффициент жёсткости постели при действии касательных напряжений в плоскости скалывания (при сдвиге балки).

Так как удобнее обращаться с относительными величинами, то введём понятие «относительной толщины гипотетического упругого слоя».

Тогда, согласно результатам данных экспериментов, в случае действия нормальных и касательных напряжений, величина эта равна:

$$\delta_1 = \frac{\Delta_1}{h} = 1,15; \text{ до } 1,49;$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta}{h} = 1,46; \text{ до } 2,0; (h — \text{толщина отщепляемой балки}).$$

Относительная толщина гипотетического упругого слоя увеличивается с увеличением расстояния рассматриваемого сечения от начала координат — 0 (см. рис. 5).

#### Вывод формул для упругой оси стружки-балки

Из предыдущего можно заключить, что поведение откалываемой части деревянного бруса, поскольку в древесине при высокой скорости протекания процессов резания будет отсутствовать пластическая деформация вплоть до самого момента разрушения, диктуется, во-первых, упругими свойствами этой части бруса, а во-вторых, упругими свойствами её связей с основанием.

Пропорциональность максимальной величины напряжения, а следовательно, и напряжения в гипотетическом упругом слое, величине деформации или, что то же, — прогибу средней линии откалываемой части бруса, позволяет воспользоваться методами исследования балок, лежащих на упругом основании.

Вывод формул произведен в три этапа.

Определение распределения тангенциальных напряжений по плоскости скалывания от горизонтальной составляющей полного усилия резания —  $P_0$ .

Нахождение уравнения упругой оси балки, конечной длины  $l$ , упруго связанной с основанием, нагруженной произвольной нагрузкой на одном конце, — см. рис. 6.

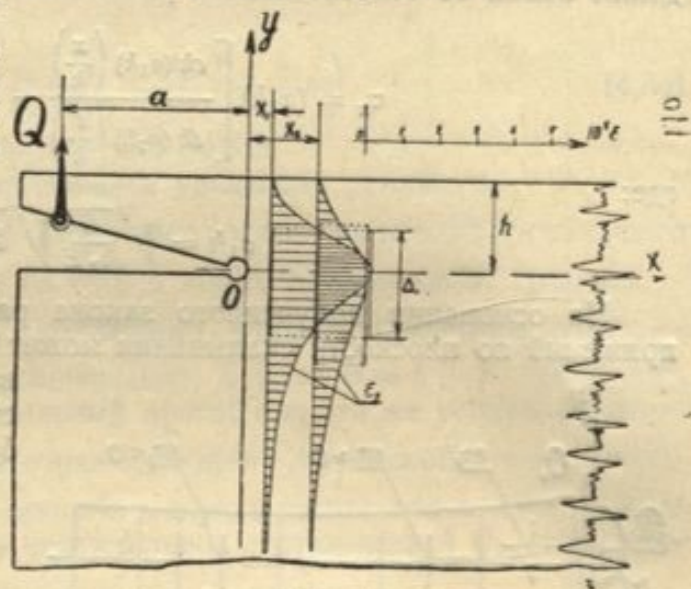


Рис. 5.

Определение положения взаимного равновесия внешних и внутренних сил, действующих на ту же балку, имеющую консольную часть длиной  $a$ , — см. рис. 7.

Для упрощения выводов все расчёты произведены для балки единичной ширины (то есть  $b = 1$  см).

Рассмотрение деформации упругой балки единичной ширины, упруго связанной с основанием, от действия сдвигающей её горизонтальной силы  $P_0$  (см. рис. 6) — даёт такую зависимость тангенциального напряжения на подошве балки от относительного расстояния:

$$\tau_x = (\alpha_1 h) \left[ \frac{ch(\alpha_1 h) \left(\frac{x}{h}\right)}{th(\alpha_1 h) \left(\frac{l}{h}\right)} - sh(\alpha_1 h) \left(\frac{x}{h}\right) \right] \sigma_0, \quad (4,1)$$

где:

$$\alpha_1 h = \sqrt{\frac{G}{\delta_2 E}} \sqrt{1 + \frac{h}{H}}.$$

На основании полученного закона распределения тангенциальных напряжений по плоскости скалывания может быть определена величина скалывающей силы —  $P_0$  макс. в зависимости от длины  $l$  скалываемого бруска. Получается:

$$P_0 = \tau_0 h \left( \frac{th \alpha_1 l}{\alpha_1 l} \right). \quad (4,2)$$

Именно по этой формуле построена кривая, нанесённая сплошной линией на графике (см. рис. 4) экспериментальных значений скалывающей силы, полученных Н. А. Дмитриевой.

Рассмотрение равновесия элемента балки, лежащей на упругом основании, с произвольной нагрузкой на конце даёт в общем случае следующее уравнение упругой оси балки:

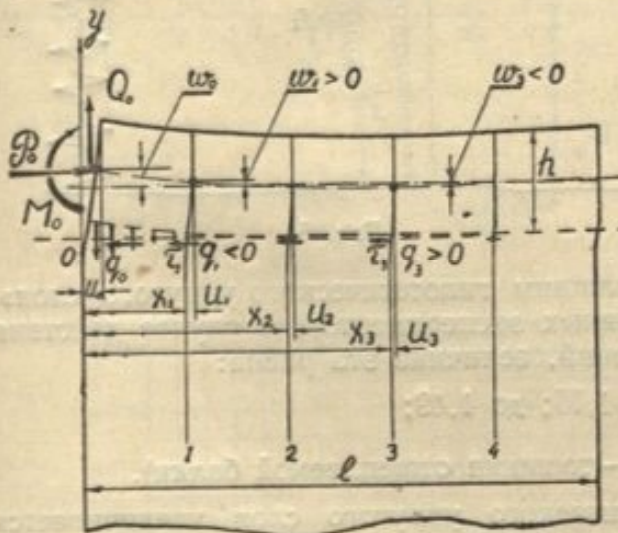


Рис. 6.

$$w_x = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) + \frac{\eta}{\alpha^2} \frac{h}{2} \frac{P_0}{EI} \left( ch \alpha x - \frac{sh \alpha x}{th \alpha l} \right). \quad (4,3)$$

В случае балки большой длины, когда  $tg \alpha l = 1$ , постоянные коэффициенты —  $C$  принимают следующий вид:

$$C_1 = C_2 = 0; \\ C_3 = \frac{6P_0}{(\beta h)^2 E_x} \left[ \frac{M_0}{P_0 h} + \frac{Q_0}{P_0 (\beta h)} + \frac{\eta}{2} \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \right]; \\ C_4 = \frac{6P_0}{(\beta h)^2 E_x} \left[ \frac{\eta}{2} - \frac{M_0}{P_0 h} \right].$$

В этих формулах, как и в дальнейшем, обозначено:

$$\beta h = \sqrt[4]{\frac{3E_1}{\delta_1 E_x}}; \quad \alpha h = \sqrt{\frac{G}{\delta_2 E_x}}; \quad \eta = \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^4}.$$

В случае, когда длина исследуемого бруса значительная, то есть превышает толщину бруса более, чем в 16 раз, величина гиперболического тангенса практически равна единице, то есть:

$$th\alpha l = 1.$$

Относительный прогиб в начале координат (то есть там, где он имеет максимальное значение) может быть определен, если положить  $x = 0$ , тогда:

$$e^{\beta x} = e^{-\beta x} = e^0 = 1;$$

$$\cos \beta x = ch\alpha x = 1; \sin \beta x = sh\alpha x = 0.$$

В таком случае получаем:

$$\frac{w_0}{h} = \frac{\sigma}{(\beta h)^2} \cdot \frac{\sigma_0}{E_x} \left( \frac{M_0}{P_0 h} + \frac{ctg Q}{(\beta h)} + \frac{\eta}{2} m \right) \quad (4,3a)$$

Полученная формула имеет физический смысл.

Относительный прогиб пропорционален удельному усилию  $\sigma_0$ .

Первый член в скобках  $\frac{M_0}{P_0 h}$  показывает влияние на прогиб изгибающего момента  $M_0$  в начале координат, то есть в конце опережающей трещины.

Второй член в скобках  $\frac{ctg \Theta}{(\beta h)}$  показывает влияние геометрии резца, — чем меньше угол резания  $\delta$  (а следовательно, и угол  $\Theta = \delta + \mu$ , где  $\mu$  есть угол трения), тем больше относительный прогиб при том же усилии резания.

Третий член в скобках  $\frac{\eta}{2} m$  отражает эффект Журавского, то есть показывает величину относительного прогиба в случае отсутствия в начале координат изгибающего момента  $M_0$  и вертикальной составляющей  $Q_0$ , что получается при  $\Theta = 90^\circ$ .

В связи с последним следует отметить, что при отсутствии изгибающего момента и вертикальной составляющей, то есть при  $P_0 = Q_0 = 0$ , коэффициенты  $C_3$  и  $C_4$  не пропадают, а становятся равными:

$$C_3 = \frac{6}{(\beta h)^2} \cdot \frac{P_0 h}{E_x} \cdot \eta \cdot \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right);$$

$$C_4 = \frac{6}{(\beta h)^2} \cdot \frac{P_0 h}{E_x} \cdot \eta.$$

Следовательно, при действии одной лишь горизонтальной сдвигающей силы  $P_0$  вертикальный прогиб будет существовать и выражаться тем же самым уравнением — (4,3), что также полностью совпадает с результатами опытов Журавского.

В случае действия одной только силы  $Q$  уравнение упругой оси балки-стружки выразится уравнением:

$$w_x = e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x),$$

где:

$$C_3 = \frac{6}{(\beta h)^2} \cdot \frac{Q_0}{E_x} \left( \frac{M_0}{Q_0 h} + \frac{1}{\beta h} \right);$$

$$C_4 = -\frac{6}{(\beta h)^2} \cdot \frac{Q_0}{E_x} \cdot \frac{M_0}{Q_0 h}.$$

В этих формулах, как и далее,

$$\frac{M_0}{Q_0 h} = \xi;$$

$$m = 2 \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 + \frac{\alpha}{\beta} - 1;$$

$$n = 2 \frac{\beta}{\alpha} + \frac{\alpha}{\beta} - 2.$$

Для данных опытов по раскалыванию симметричных образцов бука  $E_y \cong 16.000 \text{ кг/см}^2$ ;  $E_x \cong 140.000 \text{ кг/см}^2$ ;

$$h \cong 2 \text{ см}; \quad \xi \cong 2; \quad \beta h = 0,965;$$

$$C_3 = 1,405 \cdot 10^{-4} \cdot Q;$$

$$C_4 = 0,924 \cdot 10^{-4} \cdot Q.$$

Кривая на графике рис. 2 построена именно по этим коэффициентам. Наконец, рассматривая равновесие полубесконечной балки, упруго связанной с основанием и имеющей свободный от связей с основанием конец, длиной  $a = \xi h$ , к которому приложена сила, имеющая как продольную, горизонтальную  $P_0$ , так и вертикальную (поперечную), составляющую  $Q_0$ , можно получить выражение для относительного прогиба свободного конца балки  $\frac{Y_a}{h}$ .

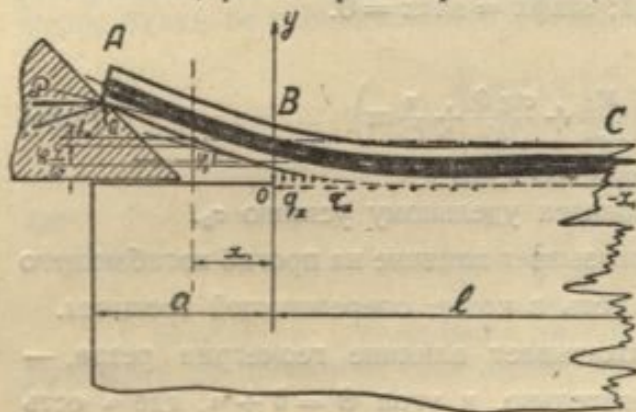


Рис. 7.

Схема деформаций, прогибов, действующих сил и напряжений приведена на рис. 7.

В окончательном виде выражение для относительного прогиба точки «А» свободного конца балки имеет следующий вид:

$$\frac{Y_0}{h} = \frac{w_0}{h} + \xi \left( \frac{\text{tg } \rho}{\rho} - 1 \right) \text{ctg } \Theta + \xi \frac{\text{tg } \rho}{\rho} \cdot \tau_0. \quad (4,4)$$

В этой формуле

$$\tau_0 = 2(\beta h) \cdot \frac{w_0}{h} - \frac{K}{2(\beta h)^2} \left[ \frac{h}{2} (2m + n) (\beta h) + \text{ctg } \Theta \right] \quad (4,5)$$

$$\frac{w_0}{h} = \frac{6}{(\beta h)^2} \frac{\sigma_0}{E_x} \left( \frac{M_0}{\rho_0 h} + \frac{\text{ctg } \theta}{\beta h} + \frac{\eta}{2} m \right); \quad (4,6)$$

$$\frac{M_0}{\rho_0 h} = \mathcal{K} \left\{ \frac{K}{2(\beta h)^2} \left[ \frac{\eta}{2} n (\beta h) + \text{ctg } \Theta \right] + \text{ctg } \Theta \right\} (\xi h); \quad (4,7)$$

$$\mathcal{K} = \frac{\xi \frac{\text{tg } \rho}{\rho}}{(\beta h) + K \xi \frac{\text{tg } \rho}{\rho}}. \quad (4,8)$$

Здесь:

$$\rho = \gamma \cdot a = \gamma \cdot \xi \cdot h;$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_0}{E_x J}} = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{12\sigma_0}{E_x}};$$

$$K = \left( \frac{\rho}{\xi} \right)^2 = \frac{12\sigma_0}{E_x}; \quad \text{откуда } \sigma_0 = \frac{E_x}{12} \cdot K; \quad \text{ctg } \Theta = \frac{Q_0}{P_0}.$$

Величина максимального нормального напряжения на растяжение поперёк волокон в начале координат находится по формуле:

$$q_0 = \frac{w_0}{h} \cdot \left( \frac{E_y}{b_1} \right).$$

Величина максимального тангенциального напряжения в плоскости расщепления, также в начале координат, определяется по формуле:

$$\tau_0 = (\alpha h) : \sigma_0. \quad (4,10)$$



Разрушение, то есть дальнейшее развитие трещины, произойдет в том случае, если в процессе увеличения величина  $R$  достигнет значения единицы:

$$\left(\frac{q_0}{\sigma_{впр}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_0}{\tau_{впр}}\right)^2 = R \rightarrow 1. \quad (4,11)$$

Во время процесса постепенного увеличения трещины максимальная величина нормального напряжения сжатия от изгиба, которая может быть определена по формуле

$$\sigma_{сж} = \sigma_0 \left(\frac{M_0}{P_0 h} + 1\right), \quad (4,12)$$

постепенно возрастает. И когда это напряжение, наконец, станет равным временному сопротивлению древесины на сжатие волокон — дальнейшее развитие трещины прекратится и начнется необратимый изгиб стружки, имеющий много общего с явлением пластического изгиба. Во время этого отгиба образовавшегося элемента стружки могут происходить разрушения структуры стружки. Хотя наибольшие разрушения вносит резец в тот момент, когда в процессе своего движения он подвинется вплотную к отогнутому элементу и через его волокна начнет создавать усилие для отделения следующего элемента.

Полученные формулы дают возможность полностью исследовать изменения напряжений в древесине и сил, действующих на переднюю грань резца.

Подобный анализ удобнее всего начинать по приближенной формуле — (4,4). Пренебрегая величиной относительного прогиба  $\frac{w_0}{h}$ , а также девиацией —  $\varphi_0$  — в начале координат, можно получить приближенную формулу:

$$\frac{Y_a}{h} \cdot \frac{\text{tg } \theta}{\xi} = \frac{\text{tg } \rho}{\rho} - 1. \quad (4,4a)$$

Производя расчёт для определённого угла резания  $\delta$ , а следовательно, и определённого  $\Theta = \delta + \mu$  для заданного значения  $\left(\frac{Y_a}{h}\right)_{\text{исл.}}$ , каждой величине длины  $\xi$  опережающей трещины соответствует определённое значение  $\rho$ , а следовательно, —  $\sigma_0$  и  $P_0$ .

После этого по точным формулам могут быть определены все величины:

$$K; \mathcal{J}; \frac{M_0}{\rho_0 h}; \frac{w_0}{h}; \tau_0; \sigma_0; R; \sigma_{сж}; \text{ и } \frac{Y_a}{h}.$$

Все величины наносятся на график в функции от  $\xi$  (см. рис. 8).

Точки пересечения кривых  $R$  с горизонталью  $R = 1$  дают соответственные значения на кривых  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{сж}$  и  $\frac{Y_a}{h}$ .

После соединения соответствующих точек получаются кривые зависимости этих величин от длины опережающей трещины  $\xi$ .

Но каждому значению относительного прогиба точки  $a$  соответствует определённая величина пути продвижения резца  $S$ , так как:

$$S = \frac{Y_a}{\text{tg } \delta}.$$

Таким образом, величины удельного усилия резания  $\sigma_0$  и напряжения сжатия верхних волокон отгибаемой стружки  $\sigma_{сж}$  могут теперь быть нанесены на график в функции пути резца, то есть в таком виде, в котором легче всего эти функциональные зависимости могут быть получены экспериментально.

Как видно из графика на рис. 8, удельное усилие сопротивления стружки уменьшается с увеличением длины опережающей трещины  $\xi$ . В начале пути внедрения резца в торцевую грань древесного бруска опережающей трещины ещё не существует; по мере внедрения лезвия в древесину увеличивается



образца древесины, развитие опережающей трещины приостанавливается и наступает третий этап.

В течение третьего этапа происходит отгиб отделившегося элемента стружки, подвигающейся гранью резца; сопротивление стружки невелико, и с увеличением пути резца оно ещё более падает. К концу третьего периода передняя

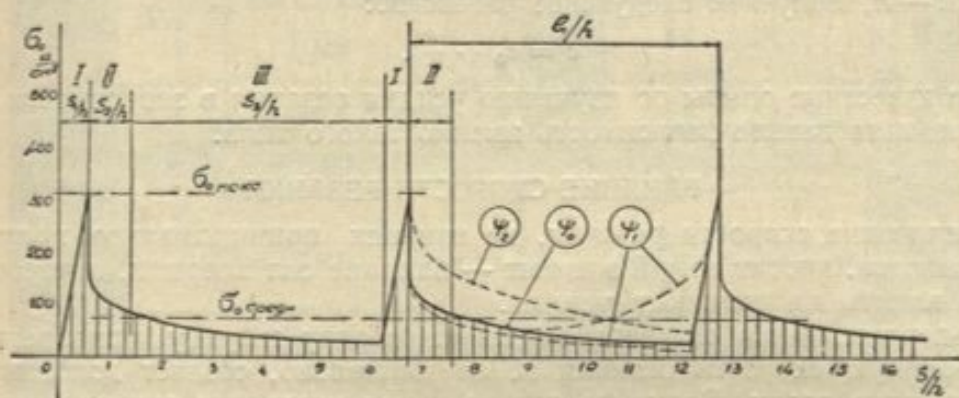


Рис. 9.

грань резца совпадает с отклонившимся элементом стружки, после чего начинается снова первый этап — новое нарастание усилия от внедрения резца в древесину, которое приведёт к образованию следующего элемента стружки.

На графике, на рис. 9, дано периодическое изменение удельного усилия резания при обработке бука с углом резания в  $45^\circ$ .

### Влияние некоторых факторов

#### УПРУГОСТЬ РЕЗЦА

Из какой бы стали ни был выполнен резец, под влиянием сил давления на его переднюю грань он имеет прогиб.

Полная величина прогиба складывается из:

а) прогиба клиновидной части, который равен:

$$Y = \Phi \left[ \ln \left( \frac{X_0}{X} \right) + \frac{X}{X_0} - 1 \right], \quad (5,1)$$

где:

$$\Phi = \frac{3N_3}{2E \operatorname{tg}^3 \left( \frac{\beta^\circ}{2} \right)}.$$

$N_3$  — величина составляющей действующего на резец усилия, перпендикулярной к упругой оси резца;

$X_0$  — длина клиновидной части резца по средней линии;

$X$  — расстояние от лезвия (как точки пересечения граней резца) до точки приложения равнодействующей всех сил, действующих на резец;

$\beta^\circ$  — угол заострения резца;

$E$  — модуль упругости материала резца;

б) прогиба призматической части, который может быть определён по общеизвестным формулам прогиба консольной балки.

#### ВЛИЯНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ НА ЗАДНЕЙ ГРАНИ РЕЗЦА

Все силы, действующие на переднюю грань резца, в своей величине зависят от толщины снимаемого слоя —  $h$ .

Силы же, действующие на заднюю грань резца, как силы нормального давления, так и связанные с ними силы трения, не зависят от толщины стружки.

Таким образом, полная величина силы сопротивления движению реза  $P = P_0 + k$  равна части —  $P_0$ , пропорциональной толщине —  $h$ ,

$$P_0 = \sigma_0 h,$$

и второй части —  $k$ , непропорциональной толщине стружки.

Переходя к удельному усилию резания путём деления на толщину стружки —  $h$ , получаем следующее равенство:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{h}. \quad (5,2)$$

Все известные опыты по изучению усилия резания в зависимости от толщины резания давали зависимость именно такого типа.

#### ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ

Увеличение скорости резания, не изменяя принципиально полученных выше выводов, вносит новый элемент — влияние сил инерции, которое может двояко влиять на величину усилия.

Во-первых, масса стружки, снимаемая в одну секунду, приобретает скорость, равную скорости резания и, следовательно, создаёт дополнительное сопротивление резу. Величина такого дополнительного сопротивления при скорости резания 95 м/сек достигает половины величины ранее вычисленного статического сопротивления и равна полной величине статического сопротивления при скорости резания — 134,6 м/сек. и т. д.

Во-вторых, силы инерции быстро образующегося элемента стружки могут изменить форму данного элемента и, таким образом, повлиять на то сопротивление, которое он оказывает продвигающемуся резу. При достижении скорости распространения поперечных колебаний (в настоящем случае для бука 1165 м/сек) опережающая трещина совсем не может появиться. В таком случае величина прогиба —  $f$ , который могли бы вызвать силы инерции, в 147 раз превосходит толщину стружки. При скорости резания, равной 96 м/сек, эта величина относительно прогиба равна всего 1. Можно ожидать, что в подобном случае изменение формы изогнутой упругой оси образовавшегося элемента стружки не превзойдёт одного процента от толщины стружки.

#### Эксперимент

С целью проверки правильности полученных теоретических выводов были проведены опыты по резанию древесины с помощью, специально для этой цели построенного, тензометрического рубанка.

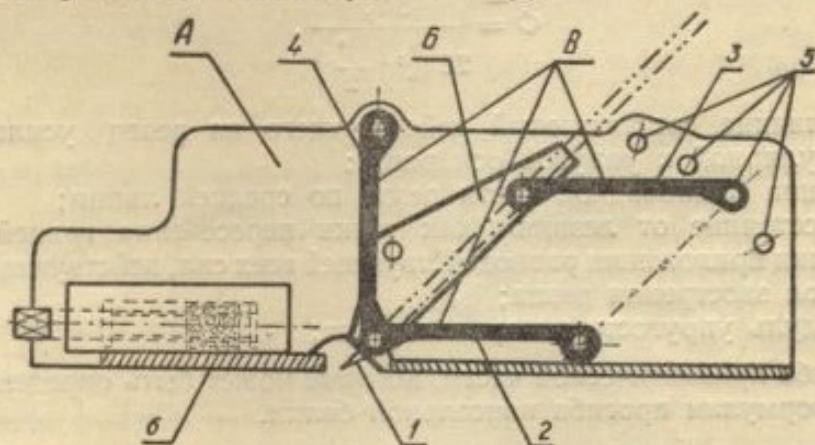


Рис. 10.

Ввиду того, что предстояло замерить очень быстро изменяющуюся величину усилия, были приняты меры к наибольшему исключению сил инерции частей, воспринимающих усилие.

Конструкция тензометрического рубанка схематически показана на рис. 10. Каретка — *Б*, с укрепленным в ней резцом — *1*, укреплена шестью чувствительными элементами — *В* в корпусе *А*.

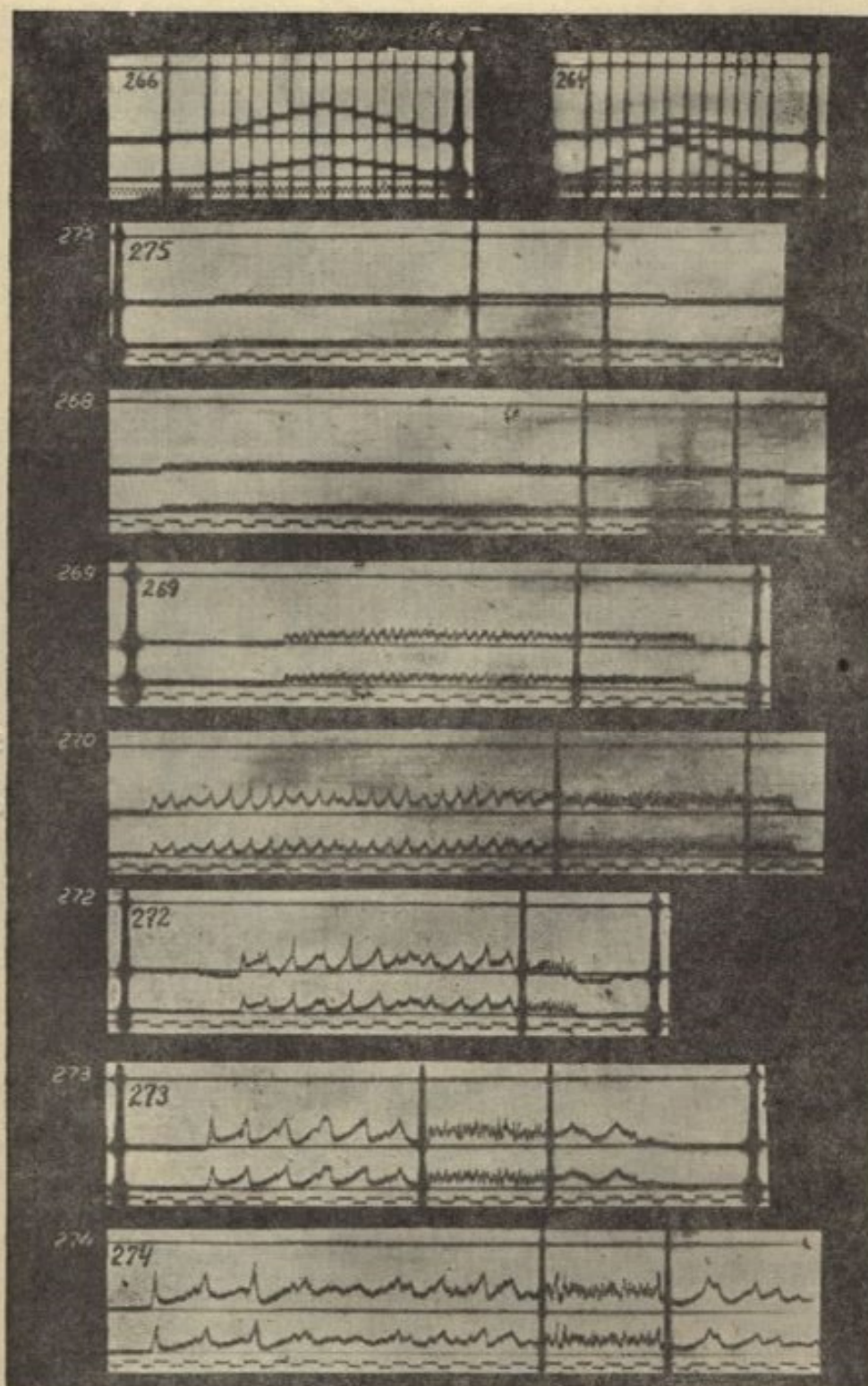


Рис. 11.

Чувствительные элементы — 2 и 3, расположенные горизонтально, воспринимают горизонтальную составляющую усилия резания — *P*. Элементы — 4, расположенные вертикально, воспринимают вертикальную составляющую — *Q*.

В зависимости от установки датчиков — 3 в одном из установочных отверстий — 5, меняется угол резания от 30 до 75° через 15°. Прижим — 6 может быть установлен на любом расстоянии от лезвия реза.

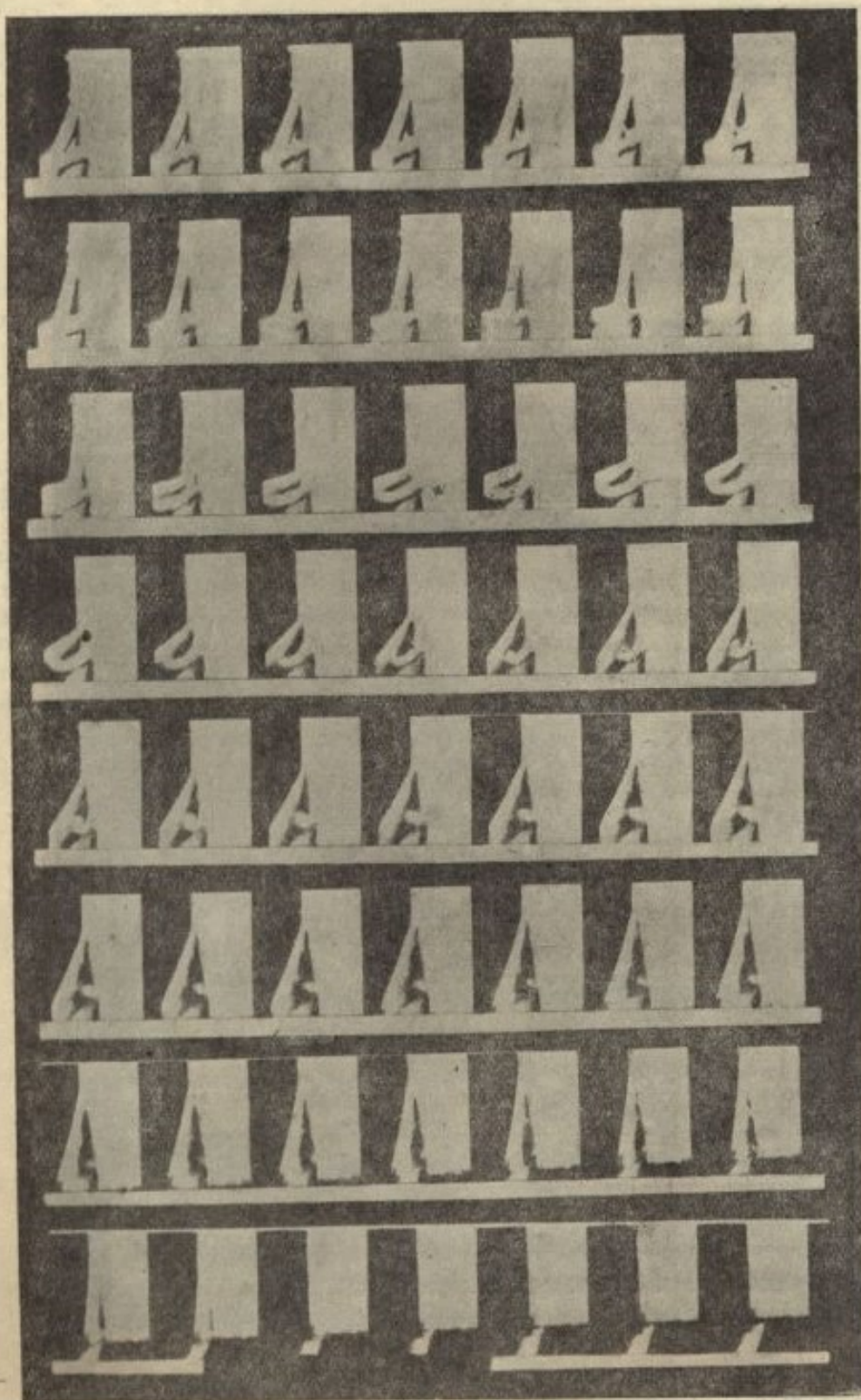


Рис. 12.

Чувствительные элементы, или датчики, представляют собой призматические стержни из дюрала, работающие на изгиб. На внешнюю и внутреннюю стороны изгибаемого стержня наклеены проволочные сопротивления, изме-

нение электрического сопротивления которых и служит средством измерения действующих сил. Импульсы электрического тока усиливаются ламповыми усилителями и записываются при помощи шлейфового осциллографа — МПО-2.

Тарировка измерительной установки производилась с помощью нагружения гириями или динамометром специального резца, имеющего валик вместо лезвия.

Результаты тарировки записывались на осциллографе так же, как и остальные осциллограммы.

Толщина стружки проверялась индикатором.

На рис. 11 дан пример записи осциллограммы тарировки и резания бука.

Установка позволила производить как визуальное наблюдение за процессом резания, так и микро-фото-киносъемку процесса, результаты её частично приведены на рис. 12.

В результате обработки осциллограммы № 273 резания букowego образца № 13 в радиальной плоскости и микро-кино-фотографирования этого же процесса получена диаграмма изменения обоих компонентов усилия резания.

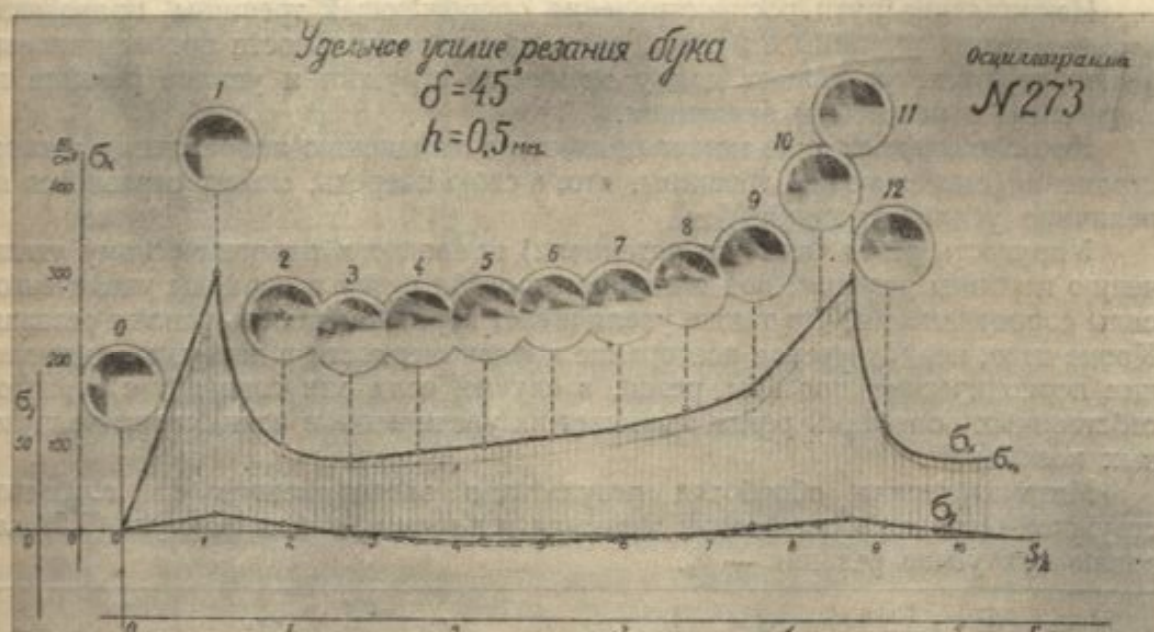


Рис. 13.

Изменение обоих компонентов усилия резания проиллюстрировано соответствующими микро-фотографиями (см. рис. 13).

Полученные в результате эксперимента материалы позволяют сделать заключение о принципиальной правильности ранее сделанных выводов.

Одновременно с этим эксперимент дал дополнительные материалы о протекании процесса стружкообразования.

Так, например, и визуальное наблюдение, и микро-фото-киносъемка показывают, что при движении резца во втором этапе образования элемента стружки в большинстве случаев опережающая трещина развивается, отклоняясь от плоскости резания в сторону уменьшения толщины стружки. В результате этого, в третьем этапе, одновременно с отгибом образовавшегося элемента стружки, лезвие резца начинает врезаться в наклонную поверхность обрабатываемого бруса, образованную отклонившейся трещиной. При этом образуется вторичная стружка. Так как толщина вторичной стружки переменная, то и образование её начинается со скобления — снятия тончайшего слоя. В это время и вертикальная составляющая усилия резания —  $Q$ , как видно на графике (см. рис. 13), меняет свой знак; резец выталкивается из обрабатываемого материала.

В процессе дальнейшего продвижения резца толщина вторичной стружки увеличивается, в результате чего увеличивается горизонтальная составляющая усилия резания —  $P$ . Вертикальная составляющая —  $Q$  снова становится положительной. Обе составляющие увеличиваются до наступления нового максимума, после чего начинается образование новой опережающей трещины.

Интенсивность нарастания усилия резания при образовании второго и всех следующих элементов стружки получается значительно меньше, чем при образовании первого элемента. Это объясняется тем, что усилие при образовании следующих элементов возникает в результате смятия передней грани резца предыдущего элемента стружки, причем смятие происходит в направлении, перпендикулярном волокнам древесины, в котором упругость её значительно меньше.

Следует отметить, что именно такое образование элементов стружки является самым типическим для процесса строгания, тогда как образование первого элемента происходит лишь один раз за время образования всей стружки.

Искривление пути распространения опережающей трещины, приводящее к уменьшению толщины стружки, даже при параллельности волокон направлению резания, уменьшает длину элементов стружки и усилие резания по сравнению с расчётным значением.

Косослой в древесине может привести к изменению направления распространения опережающей трещины, что, в свою очередь, может отразиться на величине усилия резания.

Упругость резца (или его установки) приводит к периодическому увеличению глубины резания, под влиянием прогиба резца в периоды увеличенной силы сопротивления, что также увеличивает неравномерность усилия резания. Кроме того, периодическое повторение неравномерности в нагрузке, вызывающее периодические прогибы резца, в случае, если они совпадут с периодом собственных колебаний резца, вызывает их увеличение и возникновение звуковых колебаний.

Математическая обработка результатов экспериментов со свободной стружкой бука дала следующие значения величин  $\sigma_0$  и  $k$  в формуле (5,2) для различных углов резания —  $\delta_0$ .

	$\delta_0 =$	30°	45°	60°	75°	
$\sigma$ макс.	$\sigma_0 =$	0,71	2,5	5,2	7,5	Для максимального значения
	$k =$	0,22	0,12	0,46	0,18	
$\sigma$ средн.	$\sigma_0 =$	0,61	1,16	4,15	7,3	Для среднего значения
	$k =$	0,12	0,19	0,47	0,16	

$\sigma_0$  — в кг/мм<sup>2</sup>;  $k$  — в кг/мм.

На рис. 14 даны значения удельного сопротивления резанию бука и сосны для некоторых углов резания, для максимального и среднего значений усилий резания, полученные в результате экспериментов.

#### Основные результаты работы

Результаты эксперимента подтверждают правильность выдвинутых в работе положений и полученных математических закономерностей.

Предлагаемая теория стружкообразования даёт возможность высчитать заранее все параметры отделяемой стружки, действующие внутри её напряже-



ния, и усилия сопротивления её движению резца, в соответствии с механическими свойствами обрабатываемой древесины и геометрией резца.

Результаты работы дают возможность объяснить явления, протекающие при строжке с прижимом, строжке со стружколомателем, а следовательно, активно воздействовать на процесс резания при помощи изменения параметров режущего инструмента.

Математические закономерности, полученные на основе теории балки, лежащей на упругом основании, дают возможность распространения области применения их на ряд других процессов обработки и испытания древесины.

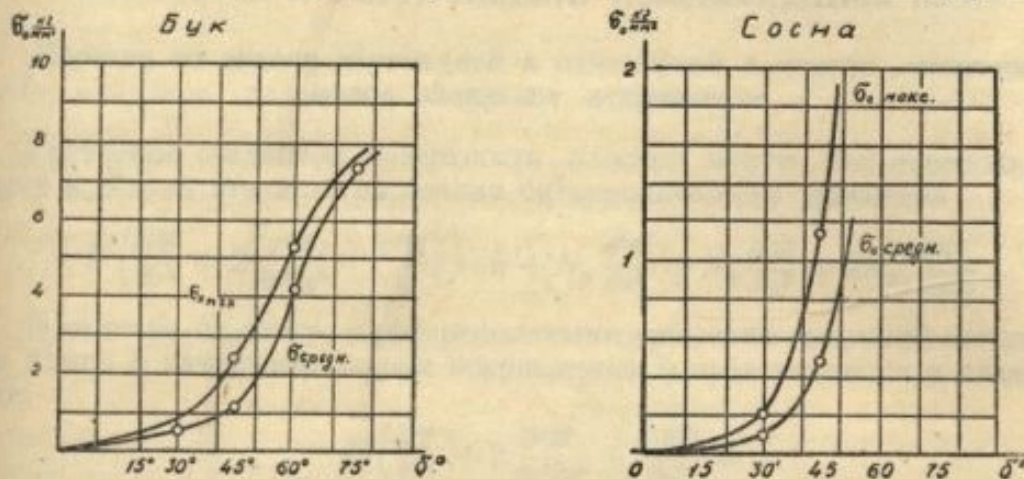


Рис. 14.

Практическими выводами из проделанной работы является возможность более рациональной эксплуатации деревообделочного оборудования на основе ясного представления о кинематике и динамике процесса стружкообразования, действующих усилиях и напряжениях.

Конструкторы деревообрабатывающих машин, при назначении конструктивных размеров элементов этих машин, могут пользоваться более точными данными о величинах максимального усилия резания; правильнее назначать мощность электродвигателей к станкам, в соответствии с данными о средней величине усилия резания; делать определённые выводы для постановки прижимов и стружколомателей для получения необходимой степени точности обработки.