

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МАШИН

539.3

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КРУГЛЫХ ПЛАСТИН ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ НАГРЕВЕ

Канд. физ.-мат. наук, доц. А.Ю. КАРПАЧЕВ

Предложен метод расчета остаточных напряжений, вызванных проковкой (вальцеванием) дисков в виде тонких кольцевых пластин.

Исследовано их влияние на устойчивость плоской формы пластины при ее неравномерном нагреве в радиальном направлении.

Analysis of the residual voltages caused by the peening or rolling of disks in the form of thin ring plates is offered.

Their influence on stability of the flat shape of a plate is explored at non-uniform heating in a radial direction.

При эксплуатации элементов конструкций в виде тонких кольцевых пластин, вращающихся вокруг оси симметрии, возможен неравномерный их нагрев вдоль радиального направления.

В зависимости от характера распределения температуры может произойти потеря устойчивости диска по всеорной (число узловых диаметров $n \neq 0$) форме или зонтичной — $n = 0$ [1, 2]. Это явление обусловлено возникновением в пластине сжимающих напряжений. Если создать в диске предварительное поле растягивающих напряжений, то можно в значительной степени уменьшить опасность потери плоской формы равновесия вследствие неравномерного нагрева. Одним из эффективных и распространенных способов, применяемых в технической практике, для достижения этого является проковка диска. Поэтому разработка наиболее простых и надежных методов определения места, степени и целесообразности проковки (вальцевания) весьма актуальна.

Рассмотрим постановку этой задачи на основе тонкой кольцевой пластины с геометрическими параметрами, показанными на рис. 1. Процесс проковки представим как симметричное сдавливание диска абсолютно жесткими кольцами радиуса r_p , толщины δ_p с силой \bar{P} . При этом расчетную схему представим, как изображено на рис. 2. Напряжение σ_z , вызванное проковкой, считаем постоянным в пределах кольцевого элемента: $r_p - \delta_p/2 \leq r \leq r_p + \delta_p/2$. Также считаем, что напряженное состояние в указанных пределах зоны проковки трехосное, в остальной области диска — двухосное. Напряжения при этом предполагаются равномерно распределенными по толщине.

Задача заключается в определении остаточного напряженного состояния в пластине после разгрузки и оценке его влияния на сопротивление потере устойчивости при неравномерном нагреве.

Рассмотрим необходимые уравнения и соотношения, позволяющие описать поведение выбранной модели. Для этого воспользуемся уравнением равновесия круглой пластины при растяжении для ее элемента, показанного на рис. 3.

$$\frac{d}{dr}(\sigma_r r) - \sigma_\theta = 0, \quad (1)$$

где σ_r, σ_θ — радиальные и окружные напряжения.

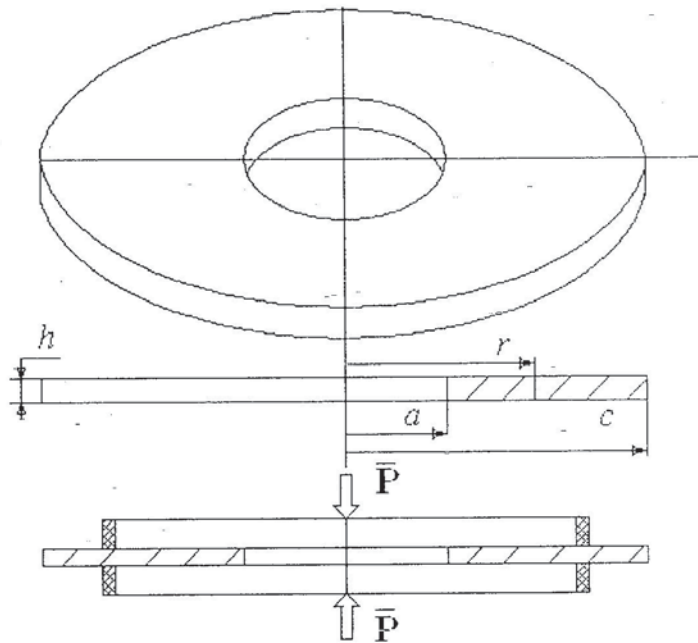


Рис. 1. Диск и конструктивная схема его проковки

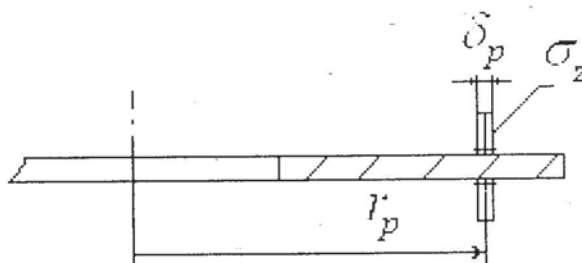


Рис. 2. Расчетная схема

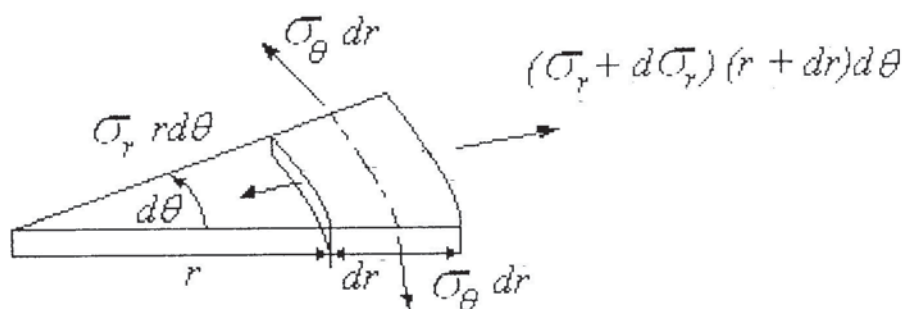


Рис. 3. К выводу уравнения равновесия при растяжении диска

Примем за u радиальные перемещения точек срединной поверхности пластины. Тогда деформационные соотношения в радиальном и окружном направлениях примут вид

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \quad (2)$$

Уравнения связи между напряжениями и деформациями в диске для использования в дальнейшем метода переменных параметров упругости [3] примем в виде

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E^*} [\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_z)], \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E^*} [\sigma_r - \mu(\sigma_r + \sigma_z)],$$

где E^* , μ — переменные параметры, зависящие от напряженно-деформированного состояния (НДС), определяемые на основе диаграммы растяжения материала диска. Для упругого состояния $E^* = E_0$ — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона.

После преобразований соотношения (1) — (3) можно записать в форме

$$\frac{d\tilde{u}}{d\tilde{r}} = \frac{(1-\mu^2)\tilde{\sigma}_r}{k} - \mu \frac{\tilde{u}}{\tilde{r}} - \frac{\mu(1+\mu)\tilde{\sigma}_z}{k}, \quad (4)$$

$$\frac{d\tilde{\sigma}_r}{d\tilde{r}} = \frac{k\tilde{u}}{\tilde{r}^2} - (1-\mu) \frac{\tilde{\sigma}_r}{\tilde{r}} + \tilde{\sigma}_z,$$

$$\tilde{\sigma}_\theta = \frac{k\tilde{u}}{\tilde{r}} + \mu\tilde{\sigma}_r + \mu\tilde{\sigma}_z, \quad (5)$$

где $\tilde{r} = \frac{r}{c}$, $\tilde{u} = \frac{c\eta}{h^2}u$, $\tilde{\sigma}_{(r-\theta,z)} = \frac{\eta c^2}{E_0 h^2} \sigma_{(r-\theta,z)}$, $E^* = kE_0$,

$$\eta = 12(1-\mu^2).$$

Добавление граничных условий завершает формулировку краевой задачи для расчета упругого напряженного состояния пластины ($k = 1$). Решение же физической нелинейной задачи сведено к последовательности решений линейных задач с переменными параметрами упругости. Численные расчеты были проведены методом начальных параметров.

Рассмотрим последовательность численного расчета упруго-пластического состояния диска при проковке и остаточных напряжениях после нее. Обратимся к пластине с геометрическими параметрами: $h = 2$ мм, $c = 120$ мм, $a = 24$ мм, и изготовленной из материала: сталь 9ХФМ ($\sigma_{0,2} = 1284$ МПа, $\sigma_B = 1411$ МПа, $\delta = 10,6\%$, $E_0 = 209$ ГПа).

Зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ эквивалентных напряжений от деформаций для указанного материала аппроксимируем функцией вида

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \varepsilon, & \text{при } \varepsilon \leq \sigma_{0,2} / E_0 = \varepsilon_y \\ \sigma_{0,2} + E' (\varepsilon - \varepsilon_y), & \text{при } \varepsilon > \varepsilon_y, \end{cases} \quad (7)$$

где $E' = 1191$ МПа.

Граничные условия на внутреннем и внешнем контуре диска примем в виде

$$r = a \quad \sigma_r = 0; \quad r = c \quad \sigma_r = 0. \quad (8)$$

После задания величин параметров $\tilde{r}_p = r_p / c$, $\tilde{\delta}_p = \delta_p / c$ и $\tilde{\sigma}_z$ решаем красвую задачу об определении упругого НДС пластины по алгоритму, аналогичному описанному в [4]. Затем в каждой точке вдоль радиуса диска проверяем выполнение условия $\sigma_i \leq \sigma_{0,2}$,

$$\text{где } \sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2}. \quad (9)$$

Если в каких-либо точках это условие нарушено, то для них проводим уточнение параметра E^* [3] (или его безразмерного аналога k , входящего в (4)—(5) с использованием диаграммы растяжения материала (7), полагая $\sigma = \sigma_i$. Далее вновь проводим решение физически линейной красвой задачи, после чего вновь уточняем упругую характеристику E^* .

На некотором этапе последовательного повторения решения указанной красвой задачи, получаемые результаты счета будут практически совпадать, что свидетельствует об определении искомого упруго-пластического НДС пластины.

В табл. 1 приведены результаты такого расчета, в которой упругое и упруго-пластическое напряженные состояния представлены в радиальных и окружных силах, приходящихся на единицу длины сечения,

$$N_{r,\theta} = \sigma_{r,\theta} h, \quad \left(\tilde{N}_{(r-\theta)} = \frac{\eta c^2}{E_0 h^3} N_{(r-\theta)} \right). \quad (10)$$

Разность значений сил, соответствующих упруго-пластическому и упругому состояниям пластины, определит ее остаточное напряженное состояние, возникающее после разгрузки. В рассматриваемом случае после завершения процесса проковки диска в табл. 2 представлены результаты расчета остаточного напряженного состояния, представленного в безразмерных параметрах \tilde{N}_r^0 , \tilde{N}_θ^0 , для трех случаев расположения зоны проковки. Рис. 4 иллюстрирует данные, сведенные в табл. 2.

Для исследования влияния найденных остаточных напряжений на устойчивость диска при ее неравномерном нагреве необходимо дополнить уже приведенные уравнения и построить недостающие соотношения на основе теории изгиба круглых пластин. Наряду с фактором воздействия температуры учтем также силы инерции q_r , обусловленные вращением диска с угловой скоростью ω . Тогда дифференциальное уравнение равновесия (1), записанное с использованием сил, показанных на рис. 5, a , примет вид [2]

$$\frac{d}{dr} (N_r r) - N_\theta + q_r r h = 0, \quad (11)$$

где $q_r = \rho \omega^2 r$ — объемная нагрузка центробежных сил (ρ — плотность материала).

Таблица 1

\bar{r}	$\bar{\sigma}_z = -250, \bar{r}_p = 0,55, \bar{\sigma}_p = 0,02$			
	НДС упругое		НДС упруго-пластическое	
	\tilde{N}_r	\tilde{N}_θ	\tilde{N}_r	\tilde{N}_θ
0,20	0,00	2,87	0,00	-23,1
0,24	0,438	2,43	-3,53	-19,6
0,28	0,702	2,16	-5,66	-17,4
0,32	0,873	1,99	-7,04	-16,1
0,36	0,991	1,87	-7,99	-15,1
0,40	1,07	1,79	-8,66	-14,4
0,44	1,14	1,73	-9,16	-13,9
0,48	1,18	1,68	-9,55	-13,6
0,52	1,22	1,64	-9,84	-13,3
0,56	-3,10	-119	-14,2	-126
0,60	-2,55	5,41	-11,6	24,6
0,64	-2,07	4,93	-9,39	22,4
0,68	-1,67	4,53	-7,58	20,6
0,72	-1,33	4,20	-6,05	19,1
0,76	-1,05	3,91	-4,77	17,8
0,80	-0,806	3,67	-3,67	16,7
0,84	-0,598	3,46	-2,72	15,8
0,88	-0,417	3,28	-1,90	14,9
0,92	-0,260	3,13	-1,18	14,2
0,96	-0,122	2,99	-0,55	13,6
1,00	0,00	2,87	0,00	13,0

Деформационные соотношения (2) при этом не изменяются, а уравнения связи между напряжениями и деформациями пластины примем в виде [3]

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_0 h} (N_r - \mu N_\theta) + \alpha T, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E_0 h} (N_\theta - \mu N_r) + \alpha T, \quad (12)$$

где T — температура, отсчитываемая от значения температуры диска после его проковки, α — коэффициент линейного расширения материала.

После несложных преобразований приведенных соотношений получим систему из двух дифференциальных уравнений

$$\frac{d\tilde{u}}{d\tilde{r}} = (1 - \mu^2) \tilde{N}_r - \mu \frac{\tilde{u}}{\tilde{r}} + (1 + \mu) \tilde{T}, \quad (13)$$

$$\frac{d\tilde{N}_r}{d\tilde{r}} = \frac{\tilde{u}}{\tilde{r}^2} - (1 - \mu) \frac{\tilde{N}_r}{\tilde{r}} - \frac{\tilde{T}}{\tilde{r}} - \tilde{q}\tilde{r},$$

и одного алгебраического

$$\tilde{N}_\theta = \frac{\tilde{u}}{\tilde{r}} + \mu \tilde{N}_r - \tilde{T}, \quad (14)$$

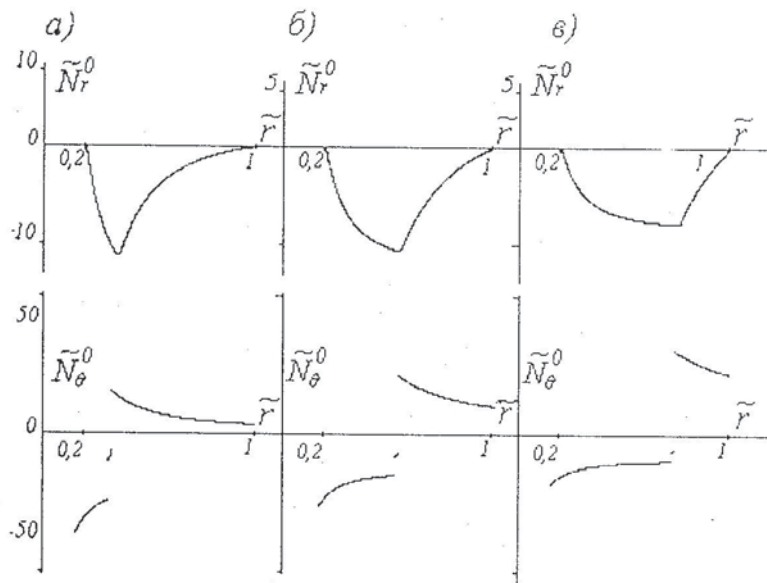


Рис. 4. Эпюры остаточных напряжений

Таблица 2

\tilde{r}	$\tilde{\delta}_p = 0,02$					
	$\tilde{\sigma}_z = -250, \tilde{r}_p = 0,35$		$\tilde{\sigma}_z = -250, \tilde{r}_p = 0,55$		$\tilde{\sigma}_z = -250, \tilde{r}_p = 0,75$	
	\tilde{N}_r^0	\tilde{N}_θ^0	\tilde{N}_r^0	\tilde{N}_θ^0	\tilde{N}_r^0	\tilde{N}_θ^0
0,20	0,00	-36,1	0,00	-26,0	0,00	-17,8
0,24	-5,51	-30,6	-3,97	-22,0	-2,73	-15,1
0,28	-8,84	-27,2	-6,36	-19,6	-4,37	-13,5
0,32	-11,0	-25,1	-7,91	-18,1	-5,44	-12,4
0,36	-11,7	-6,25	-8,98	-17,0	-6,17	-11,7
0,40	-9,17	12,7	-9,74	-16,2	-6,69	-11,2
0,44	-7,27	10,8	-10,3	-15,7	-7,08	-10,8
0,48	-5,83	9,33	-10,7	-15,2	-7,37	-10,5
0,52	-4,71	8,21	-11,1	-14,9	-7,60	-10,2
0,56	-3,82	7,32	-11,1	-6,82	-7,78	-10,1
0,60	-3,10	6,60	-9,04	19,2	-7,93	-9,91
0,64	-2,52	6,01	-7,33	17,5	-8,05	-9,79
0,68	-2,03	5,52	-5,91	16,1	-8,15	-9,69
0,72	-1,62	5,12	-4,72	14,9	-8,23	-9,61
0,76	-1,28	4,77	-3,72	13,9	-8,16	30,5
0,80	-0,98	4,48	-2,86	13,0	-6,27	28,6
0,84	-0,73	4,22	-2,12	12,3	-4,65	27,0
0,88	-0,51	4,00	-1,48	11,6	-3,25	25,6
0,92	-0,32	3,81	-0,92	11,1	-2,02	24,3
0,96	-0,15	3,64	-0,43	10,6	-0,95	23,3
1,00	0,00	3,49	0,00	10,2	0,00	22,3

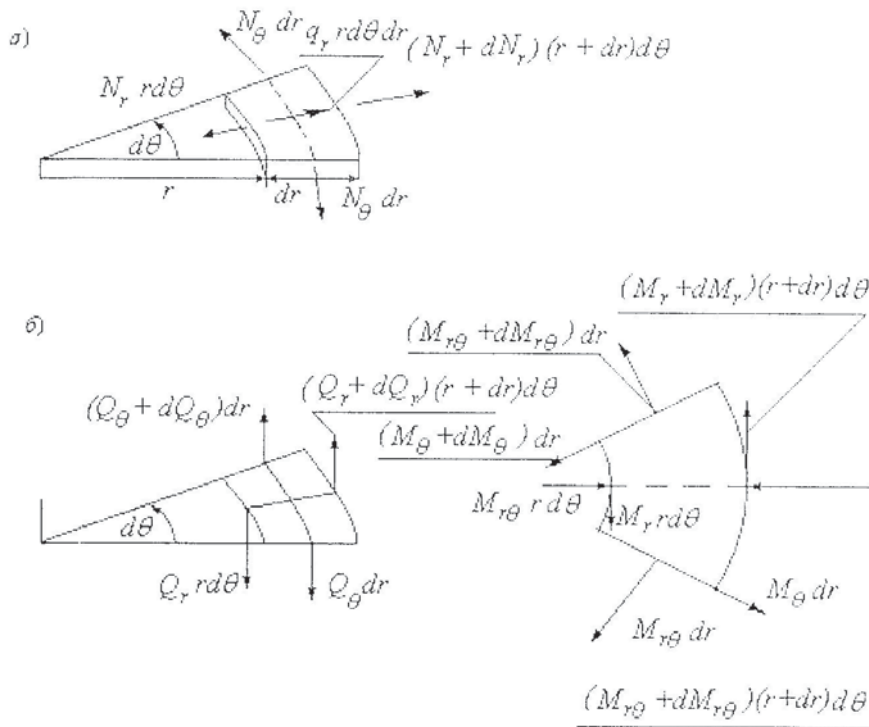


Рис. 5. Расчетные схемы к выводу основных соотношений теории круглых пластин

где переменные параметры представлены в безразмерной форме и имеют вид

$$\bar{r} = \frac{r}{c}, \quad \bar{u} = \frac{c\eta}{h^2} u, \quad \bar{q} = \frac{\eta c^4}{E_0 h^3} \rho \omega^2 h, \quad \bar{T} = \frac{\alpha c^2 \eta}{h^2} T. \quad (15)$$

Соотношения (11)—(15) позволяют найти основное напряженное состояние пластины при заранее выбранном распределении поля температур, известных граничных условиях и угловой скорости вращения.

Уравнения равновесия элемента пластины, изображенного на рис. 5, б, с учетом начальных напряжений (остаточных, температурных и инерционных), при симметричном поперечном изгибе пластины, представим в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial(rM_{r\theta})}{\partial r} + M_{r\theta} + \frac{\partial M_\theta}{\partial \theta} - Q_\theta r &= 0, \\ \frac{\partial(rM_r)}{\partial r} - M_\theta + \frac{\partial M_{r\theta}}{\partial \theta} - Q_r r &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\frac{\partial(rQ_r)}{\partial r} + \frac{\partial Q_\theta}{\partial \theta} + N_r r \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + N_\theta r \left(\frac{\partial^2 W}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} \right) - q_r h r \frac{\partial W}{\partial r} = 0,$$

где W — поперечный прогиб пластины. Уравнения (16) можно получить из соотношений, приведенных в [2], полагая распределенную инерционную силу $q_n = 0$, а $W = W(r, \theta)$.

Первые два уравнения (16) соответствуют уравнениям моментов, причем изгибающие M_r, M_θ моменты и момент кручения $M_{r\theta}$ в сечениях пластины связаны с ее прогибом соотношениями упругости

$$\begin{aligned}
 M_r &= -\frac{E_0 h^3}{\eta} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{r^2 \partial \theta^2} \right) \right], \\
 M_\theta &= -\frac{E_0 h^3}{\eta} \left[\mu \frac{\partial^2 W}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{\partial^2 W}{r^2 \partial \theta^2} \right], \\
 M_{r\theta} &= -\frac{E_0 h^3}{12(1+\mu)} \left[\frac{\partial^2 W}{r \partial r \partial \theta} - \frac{\partial W}{r^2 \partial \theta} \right].
 \end{aligned} \tag{17}$$

Приведенная поперечная сила в кольцевом сечении определяется по формуле

$$Q = Q_r + \frac{\partial M_{r\theta}}{r \partial \theta}. \tag{18}$$

Третье уравнение в (16) соответствует уравнению проекций поперечных сил (Q_r, Q_θ) на нормаль к деформированному элементу пластины. Четвертый и третий члены этого уравнения соответствуют начальному напряженному состоянию пластины.

При рассмотрении форм потери устойчивости пластины практическое значение имеют формы, возникающие без узловых окружностей при n узловых диаметрах. В связи с этим переменные, входящие в (16), представим в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 W &= w \cos(n\theta), \quad M_{r\theta} = H \sin(n\theta), \\
 M_r &= M \cos(n\theta), \quad Q_r = V_r \cos(n\theta), \\
 M_\theta &= L \cos(n\theta), \quad Q_\theta = V_\theta \sin(n\theta), \\
 Q &= V \cos(n\theta).
 \end{aligned} \tag{19}$$

Введем безразмерные параметры

$$\begin{aligned}
 \tilde{w} &= \sqrt{\eta} \frac{w}{h}, \quad \tilde{\vartheta} = \frac{c}{h} \sqrt{\eta} \vartheta, \\
 \tilde{M} &= \frac{c^2 \eta^{3/2}}{E_0 h^4} M, \quad (M \leftrightarrow H, L), \\
 \tilde{Q} &= \frac{c^3 \eta^{3/2}}{E_0 h^4} Q, \quad (Q \leftrightarrow V_r, V_\theta),
 \end{aligned} \tag{20}$$

где ϑ — угол поворота нормали к срединной поверхности, который связан с перемещением

$$\frac{d\tilde{w}}{d\tilde{r}} = \tilde{\vartheta}. \tag{21}$$

Соотношения (17) с учетом (10), (15), (19)—(21) примут вид

$$\frac{d\tilde{\vartheta}}{d\tilde{r}} = -\tilde{M} - \mu \left(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2} \tilde{w} \right). \tag{22}$$

$$\tilde{L} = -(\mu \frac{d\tilde{\vartheta}}{d\tilde{r}} + \frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2} \tilde{w}), \quad (23)$$

$$\tilde{H} = n(1-\mu)(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{\tilde{w}}{\tilde{r}^2}), \quad (24)$$

а уравнения (16) запишутся в форме

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\tilde{r}\tilde{H})}{\partial\tilde{r}} + \tilde{H} - n\tilde{L} - \tilde{V}_0\tilde{r} &= 0, \\ \frac{\partial(\tilde{r}\tilde{M})}{\partial\tilde{r}} - \tilde{L} + n\tilde{H} - \tilde{V}_r\tilde{r} &= 0, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\tilde{r}\tilde{V}_r)}{\partial\tilde{r}} + n\tilde{V}_0 + \tilde{N}_r\tilde{r}\frac{d\tilde{\vartheta}}{d\tilde{r}} + \tilde{N}_0\tilde{r}(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2}\tilde{w}) - \\ - \tilde{q}\tilde{r}^2\tilde{\vartheta} = 0. \end{aligned}$$

Исключив из (25) \tilde{V}_0 и введя $\tilde{V} = \tilde{V}_r + \frac{n}{\tilde{r}}\tilde{H}$, с учетом (22) и (23) получим

$$\frac{d\tilde{M}}{d\tilde{r}} = \tilde{V} - (1-\mu)\frac{\tilde{M}}{\tilde{r}} - \frac{1-\mu^2}{\tilde{r}}(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2}\tilde{w}) - \frac{2n^2}{\tilde{r}}(1-\mu)(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{\tilde{w}}{\tilde{r}^2}), \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{V}}{d\tilde{r}} = -\frac{2n^2}{\tilde{r}^2}(1-\mu)(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{\tilde{w}}{\tilde{r}^2}) + \frac{n^2}{\tilde{r}^2} [\mu\tilde{M} - (1-\mu^2)(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2}\tilde{w})] + \\ + \tilde{N}_r\tilde{M} + (\mu\tilde{N}_r - \tilde{N}_0)(\frac{\tilde{\vartheta}}{\tilde{r}} - \frac{n^2}{\tilde{r}^2}\tilde{w}) - \frac{\tilde{V}}{\tilde{r}} + \tilde{q}\tilde{r}\tilde{\vartheta}. \end{aligned} \quad (27)$$

Уравнения (21), (22), (26), (27) позволяют определить значение критической температуры для выбранного вида неравномерного нагрева, при котором произойдет потеря устойчивости плоской формы вращающегося диска.

Рассмотрим последовательность расчета учета влияния напряжений, вызванных проковкой пластины, на устойчивость при неравномерном нагреве вращающегося диска.

Представим распределение температуры пластины вдоль ее радиуса в виде [4]: $T = \lambda F(\tilde{r})$, где $F(\tilde{r})$ — безразмерная функция, задающая характер распределения температурного поля, λ — температурный параметр. Тогда в соответствии с (15)

$$\tilde{T} = \tilde{\lambda}F(\tilde{r}), \quad (28)$$

где
$$\tilde{\lambda} = \frac{\alpha c^2 \eta}{h^2} \lambda. \quad (29)$$

В качестве примера будут рассмотрены второй и третий случаи неравномерного нагрева $F(\tilde{r})$, разобранные в [4],

$$F_{\alpha}(\tilde{r}) = F_2(\tilde{r}) = 1 - \cos(p),$$

$$F_{\beta} = F_3(\tilde{r}) = (\tilde{k}_a - \tilde{r})^2, \tag{30}$$

где $p = 2\pi(1 - \tilde{r}) / (1 - \tilde{k}_a)$, $\tilde{k}_a = a/c$.

Пластину считаем скользящей по земле на внутреннем контуре, внешний край полагаем свободным. При этом для расчета напряженного состояния на основе уравнений (13)–(15) граничные условия сохранены в форме (8), а для определения критического значения $\tilde{\lambda}^*$ при решении задачи на собственные значения они приняты в виде

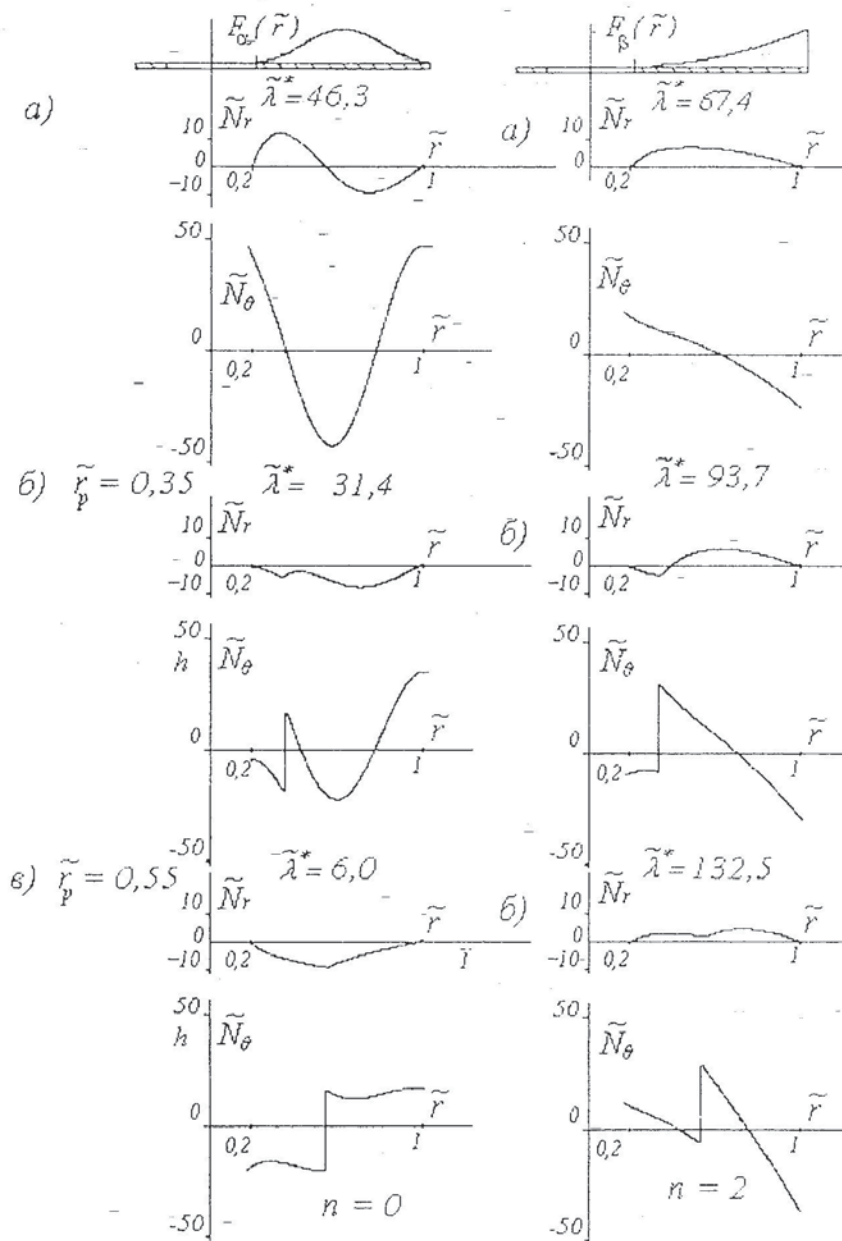


Рис. 6. Напряжения в пластине при ее потере устойчивости от неравномерного нагрева

$$r = a, \quad \tilde{w} = 0, \quad \tilde{v} = 0; \quad r = c, \quad \tilde{M} = 0, \quad \tilde{V} = 0. \quad (31)$$

Отметим, что под начальным напряженным состоянием понимается результат сложения остаточных напряжений, вызванных проковкой, с напряжениями, обусловленными неравномерным нагревом и силами инерции. При этом считается, что напряженное состояние остается упругим.

Задав параметр n и варьируя $\tilde{\lambda}$, определяем $\tilde{\lambda}^*$ с использованием численных подходов к решению задачи на собственные значения, разобранной в [1, 2, 4], при котором обращается в нуль определитель системы, обеспечивающий выполнение граничных условий на внешнем контуре пластины.

Результаты численного расчета диска приведены на рис. 6 ($\tilde{k}_a = 0,2$, $\mu = 0,3$, $\omega = 0$). На рис. 6, а изображены эпюры напряжений, полученные в [4], соответствующие потере устойчивости диска без учета в нем остаточных напряжений, для двух видов неравномерного нагрева. Для сравнения на рис. 6, б и в приведены найденные критические значения $\tilde{\lambda}^*$ и даны эпюры соответствующего напряженного состояния при тех же видах нагрева, но с учетом остаточных напряжений (табл. 2), получаемых в двух случаях расположения зоны проковки. Анализ результатов показывает, что проковка в зоне $\tilde{r}_p = 0,55$ способствует 2-кратному повышению критического значения при воздействии неравномерного нагрева по закону $F_a(\tilde{r})$, но при этом $\tilde{\lambda}^*$ уменьшается почти в восемь раз для нагрева, соответствующего $F_a(\tilde{r})$. Проковка в зоне $\tilde{r}_p = 0,35$ дает 1,5-кратное повышение $\tilde{\lambda}^*$ при нагреве с законом распределения $F_a(\tilde{r})$ и 1,5-кратное снижение, соответствующее нагреву $F_a(\tilde{r})$. Поэтому, когда есть опасность неравномерного нагрева средней зоны диска, предпочтение следует отдать проковке, соответствующей $\tilde{r}_p = 0,35$. Отметим, что наличие остаточных напряжений не оказало влияния на формы потери устойчивости.

Выводы

1. Получены количественные зависимости остаточного напряженного состояния в диске от параметров, характеризующих технологический процесс проведения проковки (напряжение $\tilde{\sigma}_z$, ширина воздействия $\tilde{\delta}_p$, радиус зоны проковки \tilde{r}_p), которые могут быть полезны при проектировании соответствующей технологической оснастки оборудования.

2. Проведенная сравнительная оценка влияния остаточных напряжений на сопротивляемость потери устойчивости диска при различных видах неравномерного нагрева позволяет проводить поиск оптимальных параметров проковки для наиболее эффективной эксплуатации диска.

3. Предложенный метод может быть использован для определения и установления допустимых режимов при эксплуатации применяемых при деревообработке дисковых пил, подвергнутых проковке (вальцеванию).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпачев А. Ю. К исследованию устойчивости дисковых пил при неравномерном нагреве // Известия вузов. Машиностроение, 2004. № 1. С. 21–24.
2. Карпачев А. Ю. Собственные динамические характеристики вращающихся круглых пил при неравномерном нагреве // Вестник машиностроения. 2006. № 5. С. 32–36.
3. Демьянушко И. В., Биргер И. А. Расчет на прочность вращающихся дисков. М.: Машиностроение, 1978. 247 с.
4. Карпачев А. Ю. Свободные колебания круглых пластин при неравномерном нагреве // Известия вузов. Машиностроение, 2005. № 4. С. 3–12.