Ó×ÅÒ ÑÈË ÈÍÅÐÖÈÈ È ÐÀÑ×ÅÒ ÍÀ ÏÐÎ×ÍÎÑÒÜ ÏÐÈ ÏÅÐÅÌÅÍÍÛÕ ÍÀÏÐßÆÅÍÈßÕ

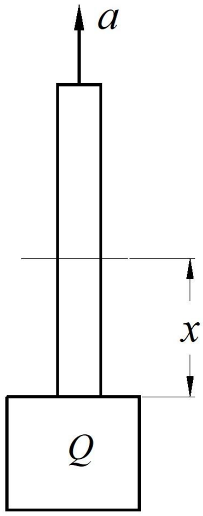
Â ïðåäûäóùèõ ðàçäåëàõ áûëè ðàññìîòðåíû ðàñ÷åòû ýëåìåíòîâ ìàøèí, ìåõàíèçìîâ è êîíñòðóêöèé ïðè èõ ñòàòè÷åñêîì íàãðóæåíèè. Â ðåàëüíûõ óñëîâèÿõ íåðåäêî ïðèõîäèòñÿ ñòàëêèâàòüñÿ ñ íàãðóçêàìè, ìåíÿþùèìè ñâîå çíà÷åíèå, ïîëîæåíèå èëè íàïðàâëåíèå â êîðîòêèå ïðîìåæóòêè âðåìåíè. Òàêèå íàãðóçêè íàçûâàþòñÿ *äèíàìè÷åñêèìè.*

Ðàñ÷åòû ïðè äåéñòâèè äèíàìè÷åñêèõ íàãðóçîê ñóùåñòâåííî óñëîæíÿþòñÿ ïî ñðàâíåíèþ ñ ðàñ÷åòîì íà íàãðóçêó, ïðèêëàäûâàåìóþ ñòàòè÷åñêè. Ïðè÷èíà çàêëþ÷àåòñÿ â áîëåå ñëîæíûõ ìåòîäàõ îïðåäåëåíèÿ óñèëèé è íàïðÿæåíèé, à òàêæå ìåõàíè÷åñêèõ õàðàêòåðèñòèê ìàòåðèàëîâ, ðàáîòàþùèõ â óñëîâèÿõ äèíàìè÷åñêîãî íàãðóæåíèÿ.

Îäíàêî, â òåõ ñëó÷àÿõ, êîãäà èçâåñòíû ñèëû èíåðöèè, ðàñ÷åòû ïðîèçâîäÿòñÿ ìåòîäàìè, èçó÷åííûìè ïðè ñòàòè÷åñêîì íàãðóæåíèè ýëåìåíòîâ. Ýòîò ïîäõîä îñíîâàí íà ïðèíöèïå Ä–Àëàìáåðà, ñîãëàñíî êîòîðîìó âñÿêîå äâèæóùååñÿ òåëî ìîæíî ñ÷èòàòü íàõîäÿùèìñÿ â ñîñòîÿíèè ìãíîâåííîãî ðàâíîâåñèÿ, åñëè ê äåéñòâóþùèì íà íåãî ñèëàì äîáàâèòü ñèëû èíåðöèè.

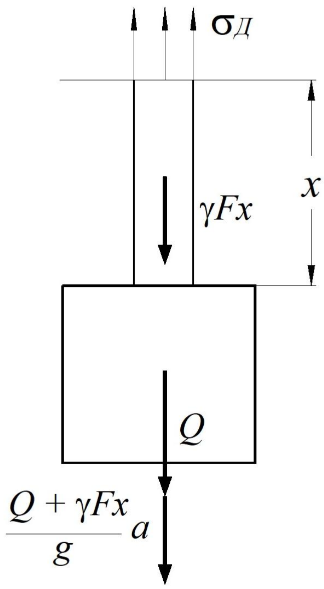
1. Âû÷èñëåíèå íàïðÿæåíèé ïðè ðàâíîóñêîðåííîì äâèæåíèè

Ïóñòü ãðóç Q, ïîäâåøåííûé íà ñòàëüíîì òðîñå ïëîùàäüþ ïîïåðå÷íîãî ñå÷åíèÿ F, ïîäíèìàåòñÿ ñ óñêîðåíèåì à (Ðèñ. 1). Îáúåìíûé âåñ ìàòåðèàëà òðîñà g.



Ðèñ. 1

Íàéäåì íàïðÿæåíèÿ â êàêîì–ëèáî ñå÷åíèè íà ðàññòîÿíèè õ îò íèæíåãî êîíöà òðîñà (Ðèñ. 2). Ðàçðåæåì åãî â ýòîì ñå÷åíèè è ðàññìîòðèì íèæíþþ îòñå÷åííóþ ÷àñòü.



Ðèñ. 2

Íîðìàëüíîå óñèëèå N ñëîæèòñÿ èç ñèëû âåñà Q, ñèëû âåñà òðîñà gFx è ñèëû èíåðöèè, êîòîðàÿ ïî çàêîíó Íüþòîíà ðàâíà

mà = (Q + gFx)a/g,

ãäå g– óñêîðåíèå ñèëû òÿæåñòè, ì/ñåê^2.

Ñëåäîâàòåëüíî, N = Q + gFx + (Q + gFx)à/g.

Äëÿ îïðåäåëåíèÿ äèíàìè÷åñêîãî íàïðÿæåíèÿ ðàçäåëèì íîðìàëüíîå óñèëèå N íà ïëîùàäü ïîïåðå÷íîãî ñå÷åíèÿ òðîñà F:

$$s_{\text{ä}} = (Q + gFx)/F + (Q + gFx)\text{à}\ /Fg.$$

Âûíåñåì çà ñêîáêó (Q + gFx)/F:

$$s_{\text{ä}} = (Q + gFx)/F(1 + \text{à}/g),$$

òàê êàê âåëè÷èíà (Q+gFx)/F ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ñòàòè÷åñêîå íàïðÿæåíèå $s_{\text{ñò}}$, ìîæåì çàïèñàòü:

$$s_{\text{ä}} = s_{\text{ñò}}\,(1 + \text{à}/g). \qquad (1)$$

Âûðàæåíèå â ñêîáêàõ ôîðìóëû (10.1) ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé äèíàìè÷åñêèé êîýôôèöèåíò:

$$k_{\text{ä}} = 1 + \text{à}/g. \qquad (2)$$

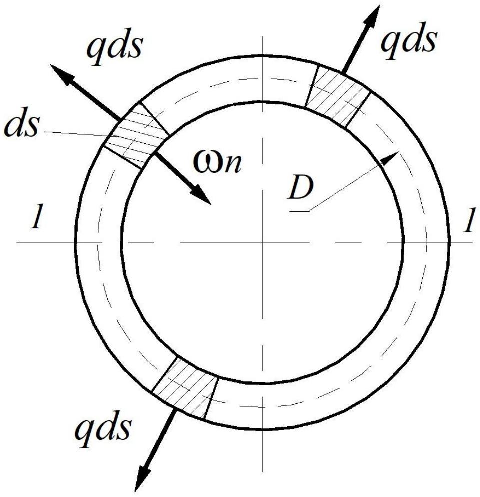
Òîãäà ôîðìóëó (10.1) ìîæíî çàïèñàòü â ñëåäóþùåì âèäå:

$$s_{\text{ä}} = s_{\text{ñò}}\,k_{\text{ä}}. \qquad (3)$$

Èç ôîðìóëû (3) âèäíî, ÷òî â î÷åíü ìíîãèõ ñëó÷àÿõ äèíàìè÷åñêèå íàïðÿæåíèÿ ìîãóò áûòü âûðàæåíû ÷åðåç ñòàòè÷åñêèå ïóòåì óìíîæåíèÿ íà ñîîòâåòñòâóþùèé äèíàìè÷åñêèé êîýôôèöèåíò.

2. Íàïðÿæåíèå â îáîäå ìàõîâèêà

Äëÿ ðåøåíèÿ ýòîé çàäà÷è âû÷èñëèì íàïðÿæåíèÿ â áûñòðî âðàùàþùåìñÿ êîëüöå ïîñòîÿííîãî ñå÷åíèÿ (Ðèñ. 3).



Ðèñ 3

Ïëîùàäü ïîïåðå÷íîãî ñå÷åíèÿ êîëüöà ïðèìåì ðàâíîé F, îáúåìíûé âåñ ìàòåðèàëà êîëüöà– g, ÷èñëî îáîðîòîâ êîëüöà â åäèíèöó âðåìåíè– n, óãëîâàÿ ñêîðîñòü âðàùåíèÿ– w, äèàìåòð îñè êîëüöà– D.

Âûäåëèì ýëåìåíò äëèíîé ds, êîòîðûé äâèæåòñÿ ïî îêðóæíîñòè ñ ïîñòîÿííîé óãëîâîé ñêîðîñòüþ w. Â ñâÿçè ñ ýòèì óãëîâîå óñêîðåíèå e=0. Ñëåäîâàòåëüíî, è òàíãåíöèàëüíîå óñêîðåíèå $w_t=0$. Öåíòðîñòðåìèòåëüíîå óñêîðåíèå áóäåò íàïðàâëåíî ê öåíòðó âàëà è îïðåäåëèòñÿ ïî ôîðìóëå:

$$w_n = w^2 D/2.$$

Ñèëà èíåðöèè, âûçûâàåìàÿ ýòèì óñêîðåíèåì, áóäåò íàïðàâëåíà íàðóæó è îïðåäåëèòñÿ ïî âòîðîìó çàêîíó Íüþòîíà:

$$P_{\text{èí}} = m w_n = w_n F g/g ds,$$

ãäå Fg /gds = m– ìàññà ýëåìåíòà, êã.

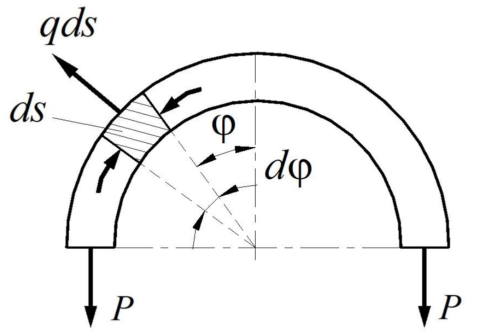
Ïîäñòàâèì â ýòî âûðàæåíèå çíà÷åíèå w_n:

$$P_{\text{èí}} = (Fg/g)\cdot(w^2 D/2ds) = qds,$$

ãäå q– èíòåíñèâíîñòü ñèëû èíåðöèè íà åäèíèöó äëèíû êîëüöà, í/ì.

Ïðèëîæèì ðàñïðåäåëåííóþ íàãðóçêó èíòåíñèâíîñòüþ q ê äèàìåòðàëüíîé ïëîñêîñòè êîëüöà.

Òîãäà âèäíî, ÷òî óñèëèÿ, ðàñòÿãèâàþùèå îáîä P = qD/2 (Ðèñ.4).



Ðèñ 4

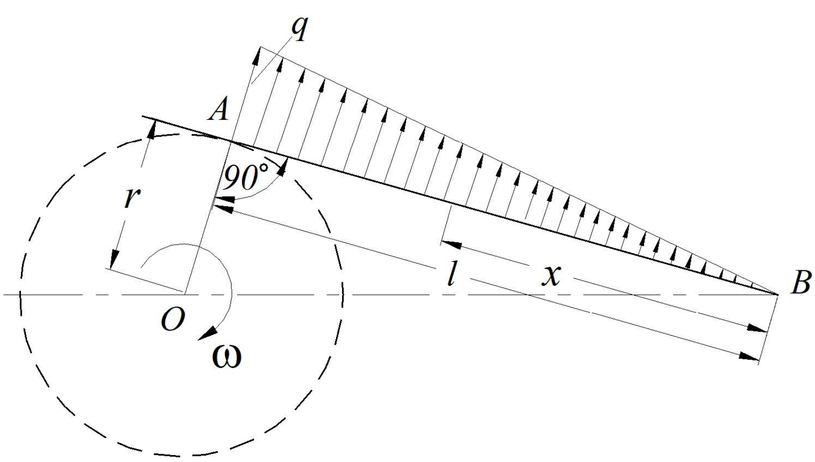
Ñëåäîâàòåëüíî, äèíàìè÷åñêîå íàïðÿæåíèå

$$s_{ä} = P/F = qD/2F = DFgw^2D/4gF = gw^2D^2/4g.$$

Òàê êàê *îêðóæíàÿ ñêîðîñòü òî÷åê êîëüöà* V = wD/2, ìîæåì çàïèñàòü $s_{ä}$ = gV /g.

3. Íàïðÿæåíèÿ â øàòóíå

Ïóñòü øàòóí ÀÂ øàðíèðíî ñêðåïëåí â òî÷êå À ñ êðèâîøèïîì ÎÀ è âðàùàåòñÿ âîêðóã òî÷êè Î ñ óãëîâîé ñêîðîñòüþ w (Ðèñ. 5).



Ðèñ 5

Òàê êàê íàèáîëåå çíà÷èòåëüíûå èíåðöèîííûå óñèëèÿ áóäóò âîçíèêàòü îò äåéñòâèÿ öåíòðîñòðåìèòåëüíîãî óñêîðåíèÿ, ðàññìîòðèì ïîëîæåíèå øàòóíà, â êîòîðîì îí ïåðïåíäèêóëÿðåí ê êðèâîøèïó. Òîãäà ìîæíî ïðåäïîëîæèòü, ÷òî öåíòðîáåæíûå ñèëû èíåðöèè q, îïðåäåëåííûå ïî ïðèíöèïó, ðàññìîòðåííîìó äëÿ îáîäà ìàõîâèêà, áóäóò âåçäå ïåðïåíäèêóëÿðíû ê îñè øàòóíà è ïî åãî äëèíå ìåíÿþòñÿ ïî ëèíåéíîìó çàêîíó îò íàèáîëüøåé âåëè÷èíû â òî÷êå À äî q = 0 â òî÷êå Â, òàê êàê â íåé öåíòðîñòðåìèòåëüíîå óñêîðåíèå ðàâíî.

Ñëåäîâàòåëüíî, ðàñ÷åòíàÿ ñõåìà ìàõîâèêà áóäåò ïðåäñòàâëÿòü ñîáîé áàëêó íà äâóõ øàðíèðíûõ îïîðàõ ñ ïðèëîæåííîé ê íåé òðåóãîëüíîé ðàñïðåäåëåííîé íàãðóçêîé. Åñëè äëÿ òàêîé áàëêè ïîñòðîèòü ýïþðó èçãèáàþùèõ ìîìåíòîâ, òî

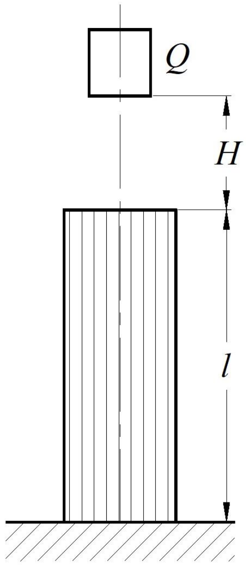
$M_{max} = ql^2 / (9Ö3)$, òàê êàê $\bar{q} = (gF / g)\, w^2 r$, a $s_{ä\ max} = (M_{max} / W)$,

$$s_{ä\ max} = ql^2 / (9Ö3W_g) = gFl^2 w^2 r / (9Ö3W_g).$$

Â ïîñëåäíåé ôîðìóëå w – óãëîâàÿ ñêîðîñòü, à g – îáúåìíûé âåñ ìàòåðèàëà øàòóíà.

4. Óäàðíîå è âíåçàïíîå ïðèëîæåíèå íàãðóçêè

Ïðè óäàðå îäíîãî òåëà î äðóãîå âîçíèêàþò óñêîðåíèÿ ó êàæäîãî èç ñîóäàðÿåìûõ òåë. Ðàññìîòðèì ïðèìåð ñâàè, çàáèâàåìîé â çåìëþ ïðè ñòðîèòåëüñòâå çäàíèÿ íà ñâàéíîì ôóíäàìåíòå (Ðèñ. 6).



Ðèñ. 6

Ïîä âîçäåéñòâèåì ïàäàþùåãî ãðóçà ÷àñòè ñâàè, áûâøèå äî ýòîãî â íåïîäâèæíîì ñîñòîÿíèè, ïîëó÷àò óñêîðåíèÿ è íà÷íóò ïåðåìåùàòüñÿ íà âåëè÷èíó ñâîåé óïðóãîé äåôîðìàöèè. Òî÷íî ðåøèòü âîïðîñ î âåëè÷èíàõ äåôîðìàöèé è íàïðÿæåíèé, âîçíèêàþùèõ â ñâàå ïðè óäàðå êîïðà, íåâîçìîæíî, òàê êàê ïðàêòè÷åñêè íåëüçÿ îïðåäåëèòü åå óñêîðåíèÿ ïðè óäàðå. Îäíàêî, îïðåäåëåíèå äåôîðìàöèé è íàïðÿæåíèé, âîçíèêàþùèõ ïðè óäàðå, âîçìîæíî íà îñíîâå èñïîëüçîâàíèÿ çàêîíà ñîõðàíåíèÿ ýíåðãèè.

Ïðè óäàðå íàáëþäàåòñÿ áûñòðîå ïðåâðàùåíèå îäíîãî âèäà ýíåðãèè â äðóãîé, à èìåííî *êèíåòè÷åñêàÿ ýíåðãèÿ óäàðÿþùåãî òåëà* Ò ïðåâðàùàåòñÿ â *ïîòåíöèàëüíóþ ýíåðãèþ äåôîðìàöèè* U òåëà, ïîäâåðãàþùåãîñÿ óäàðó. Çàïàñ ýíåðãèè óäàðÿþùåãî òåëà Ò ìîæåò áûòü âûðàæåí ôîðìóëîé:

Ò = Q(H + Dlä),

ãäå Í– âûñîòà ïàäåíèÿ óäàðÿþùåãî òåëà, ì;

Dlä– äåôîðìàöèÿ ñâàè, ì.

Íàçîâåì ñèëó âîçäåéñòâèÿ óäàðÿþùåãî òåëà â ìîìåíò óäàðà Ðä *ñèëîé óäàðà.* Õîòÿ ïðîöåññ ñîóäàðåíèÿ òåë î÷åíü êîðîòêèé, ìîæíî ïîëàãàòü, ÷òî ñèëà Ðä ðàñòåò îò íóëÿ äî ñâîåãî êîíå÷íîãî çíà÷åíèÿ ïî çàêîíó ïðÿìîé. Ñëåäîâàòåëüíî, ïîòåíöèàëüíàÿ ýíåðãèÿ ðàâíà:

$$U = 1/2\ (P_{\text{ä}}Dl_{\text{ä}}).$$

Äëÿ áîëüøèíñòâà çàäà÷ ïðè ðàñ÷åòå ýëåìåíòîâ íà óäàðíûå íàãðóçêè ïîòåðÿìè êèíåòè÷åñêîé ýíåðãèè óäàðÿþùåãî òåëà ìîæíî ïðåíåáðå÷ü è ñ÷èòàòü, ÷òî âñÿ åãî êèíåòè÷åñêàÿ ýíåðãèÿ ïåðåõîäèò â ýíåðãèþ äåôîðìàöèè òåëà, âîñïðèíèìàþùåãî óäàð: T = U, ïîýòîìó ìîæåì çàïèñàòü $Q(H + Dl_{\text{ä}}) = 1/2\ (P_{\text{ä}}Dl_{\text{ä}})$.

Òàê êàê ïî çàêîíó Ãóêà $Dl_{\text{ä}} = P_{\text{ä}}l/(EF)$, òî $P_{\text{ä}} = Dl_{\text{ä}}EF/1$, òîãäà $U=Dl_{\text{ä}}^2EF/(2l)$.

Ñëåäîâàòåëüíî, $Q(H + Dl_{\text{ä}}) = Dl_{\text{ä}}^2EF/(2l)$.

Âñå ÷ëåíû ýòîãî âûðàæåíèÿ ïåðåíîñèì â ëåâóþ ÷àñòü è äåëèì íà $EF/(2l)$:

$$Dl_{\text{ä}}^2 - 2Ql/(EF)Dl_{\text{ä}} - 2HQl/(EF) = 0,$$

íî âåëè÷èíà $Ql/(EF)$ ïðåäñòàâëÿåò ñîáîé ïî çàêîíó Ãóêà ñòàòè÷åñêóþ äåôîðìàöèþ $Dl_{\text{ñò}}$ ïðè ñòàòè÷åñêîì ïðèëîæåíèè ãðóçà ê ñâÿçè, ñëåäîâàòåëüíî, $Dl_{\text{ä}}^2 - 2Dl_{\text{ä}}Dl_{\text{ñò}} - 2HDl_{\text{ñò}} = 0$.

Ðåøàÿ ýòî êâàäðàòíîå óðàâíåíèå, ïîëó÷èì çíà÷åíèå äèíàìè÷åñêîé äåôîðìàöèè $Dl_{\text{ä}}$:

$$Dl_{\text{д}} = Dl_{\text{ст}} + Ö\overline{Dl^2_{\text{ст}} + 2HDl_{\text{ст}}}, \qquad (4)$$

извлекаем из–под корня $Dl_{\text{ст}}$: $Dl_{\text{д}} = Dl_{\text{ст}} + Dl_{\text{ст}}Ö\overline{1 + 2H/Dl_{\text{ст}}}$, или вынесем за скобку $Dl_{\text{ст}}$:

$$Dl_{\text{д}} = Dl_{\text{ст}}(1 + Ö\overline{1 + 2H/Dl_{\text{ст}}}). \qquad (5)$$

В формуле (10.5) выражение в скобках представляет собой динамический коэффициент $k_{\text{д}}$:

$$k_{\text{д}} = 1 + Ö\overline{1+2H/Dl_{\text{ст}}}. \qquad (6)$$

Ñëåäîâàòåëüíî, êàê è ïðè ðàâíîóñêîðåííîì äâèæåíèè, çàäà÷à ñâîäèòñÿ ê îïðåäåëåíèþ ñòàòè÷åñêîé äåôîðìàöèè è äèíàìè÷åñêîãî êîýôôèöèåíòà.

$$Dl_{\text{ä}} = Dl_{\text{ñò}}k_{\text{ä}}. \qquad (7)$$

Ðàçäåëèì ëåâóþ è ïðàâóþ ÷àñòè ôîðìóëû (10.7) íà äëèíó ñâàè 1: $Dl_{\text{ä}}$ /l = $Dl_{\text{ñò}}k_{\text{ä}}$ /l; çäåñü: $Dl_{\text{ä}}$/l = $e_{\text{ä}}$, à $Dl_{\text{ñò}}$ /l = $e_{\text{ñò}}$ [ñì. ôîðìóëó (1.4)], òîãäà $e_{\text{ä}} = e_{\text{ñò}}k_{\text{ä}}$. Â ïîñëåäíåì âûðàæåíèè ëåâóþ è ïðàâóþ ÷àñòè óìíîæèì íà ìîäóëü Þíãà: $e_{\text{ä}}E = e_{\text{ñò}}Ek_{\text{ä}}$, íî ïî ôîðìóëå (1.8) $e_{\text{å}}E = s_{\text{ä}}$, à $e_{\text{ñò}}E = s_{\text{ñò}}$, òîãäà:

$$s_{\text{ä}} = s_{\text{ñò}}k_{\text{ä}}. \qquad (8)$$

Â ñëó÷àå âíåçàïíîãî óäàðà, íàïðèìåð, óäàð êîëåñà ïîåçäà íà ñòûêàõ ðåëüñ, â ôîðìóëå (10.4) Í = 0, òîãäà ïîëó÷èì:

$$Dl_{\text{ä}} = 2D_{\text{ñò}}. \qquad (9)$$

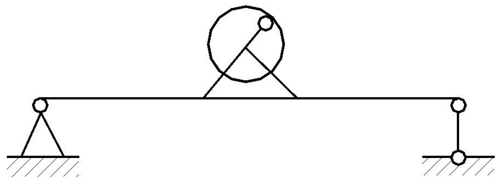
Ñëåäîâàòåëüíî, ïðè âíåçàïíîì óäàðå $k_{\text{ä}} = 2$, à ôîðìóëà (10.8) ïðèìåò âèä:

$$s_{\text{ä}} = 2s_{\text{ñò}}. \qquad (10)$$

Ïðè âíåçàïíîì äåéñòâèè íàãðóçêè íàïðÿæåíèÿ â ñèñòåìå âäâîå áîëüøå, ÷åì ïðè ñòàòè÷åñêîì äåéñòâèè òîé æå íàãðóçêè.

5. Ðàñ÷åòû ïðè êîëåáàíèÿõ

Åñëè íà áàëêå ðàñïîëîæåíà ìàøèíà ñ âðàùàþùèìñÿ ãðóçîì, èìåþùèì ýêñöåíòðèñèòåò ïî îòíîøåíèþ ê îñè âðàùåíèÿ, ñèëà èíåðöèè ãðóçà áóäåò âûçûâàòü â áàëêå íàïðÿæåíèÿ è äåôîðìàöèè, ïåðèîäè÷åñêè ìåíÿþùèå ñâîé çíàê (Ðèñ. 7).



Ðèñ 7

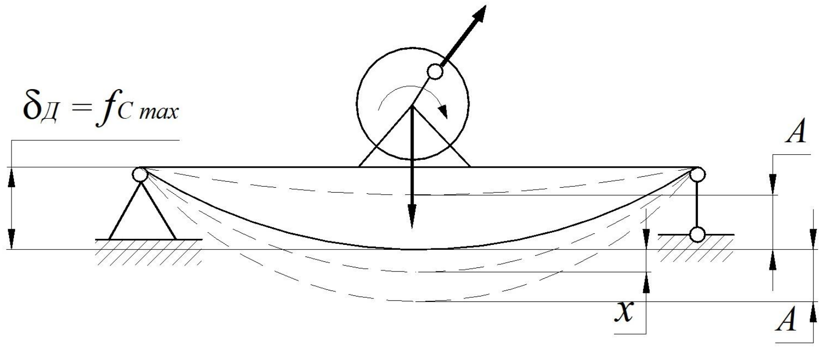
Áàëêà áóäåò ñîâåðøàòü êîëåáàíèÿ ñ ïåðèîäîì, ðàâíûì ïåðèîäó âðàùåíèÿ ãðóçà. Ýòî áóäóò *âûíóæäåííûå* êîëåáàíèÿ. Åñëè ïåðèîä âûíóæäåííûõ êîëåáàíèé ñîâïàäàåò ñ ïåðèîäîì *ñîáñòâåííûõ* êîëåáàíèé áàëêè, òî ìû ïîëó÷èì ÿâëåíèå *ðåçîíàíñà,* ïðè êîòîðîì àìïëèòóäà êîëåáàíèé áóäåò ðåçêî ðàñòè ñ òå÷åíèåì âðåìåíè.

Èçâåñòåí ñëó÷àé, êîãäà ïðè ðåçîíàíñå óãîë çàêðó÷èâàíèÿ âàëà óâåëè÷èëñÿ â øåñòü ðàç ïî ñðàâíåíèþ ñ òåì óãëîì, êîòîðûé áûë äî íàñòóïëåíèÿ ðåçîíàíñà– ñëó÷àé ïîëîìêè êîëåí÷àòûõ âàëîâ äâèãàòåëåé ñàìîãî áîëüøîãî íà òî âðåìÿ äèðèæàáëÿ â ìèðå "Öåïïåëèíà" ïðè ïåðåëåòå ÷åðåç Àòëàíòèêó èç Ãåðìàíèè â Àìåðèêó. Ýòîò äèðèæàáëü çàòåì â 1937 ãîäó ïîòåðïåë êàòàñòðîôó â Íüþ–Éîðêå.

Òàêèì îáðàçîì, ÿâëåíèå ðåçîíàíñà, åñëè îíî äëèòñÿ íåêîòîðîå âðåìÿ, âåäåò ê ðîñòó äåôîðìàöèé è ïðîïîðöèîíàëüíûõ èì íàïðÿæåíèé â ýëåìåíòå, ÷òî ìîæåò âûçâàòü ïîëîìêó. Ïîýòîìó ïðè ïðîåêòèðîâàíèè ïîäîáíûõ êîíñòðóêöèé íåîáõîäèìî èçáåæàòü âîçíèêíîâåíèÿ ðåçîíàíñà.

Ìåòîäû îïðåäåëåíèÿ ïåðèîäà, ÷àñòîòû è àìïëèòóäû ñîáñòâåííûõ è âûíóæäåííûõ êîëåáàíèé ðàññìàòðèâàþòñÿ â òåîðåòè÷åñêîé ìåõàíèêå. Íèæå áóäåò ðàññìîòðåíî ïðèëîæåíèå ýòèõ ìåòîäîâ ê îïðåäåëåíèþ íàïðÿæåíèé è ïðîâåðêå ïðî÷íîñòè ýëåìåíòîâ ïðè êîëåáàíèÿõ.

Äëÿ ïðîâåðêè ïðî÷íîñòè, èçîáðàæåííîé íà ðèñóíêå áàëêè (Ðèñ.8), íåîáõîäèìî íàéòè íàèáîëåå îïàñíîå ñå÷åíèå ñ íàèáîëüøåé â ïðîöåññå êîëåáàíèé ñóììàðíîé âåëè÷èíîé äåôîðìàöèè.



Ðèñ 8

Äëÿ ïðîñòåéøèõ ñëó÷àåâ (â îòñóòñòâèè âîçìóùàþùåé ñèëû S) äëÿ ýòîãî íàäî ñëîæèòü íàèáîëüøóþ ñòàòè÷åñêóþ äåôîðìàöèþ $d_{\text{ñò max}}$ ñ íàèáîëüøåé àìïëèòóäîé êîëåáàíèé À, òî åñòü:

$$d_{\text{ä}} = d_{\text{ñò max}} + A = d_{\text{ñò max}}\,(1+ A/d_{\text{ñò max}}).$$

Â ýòîì âûðàæåíèè

$$k_{\text{ä}} = 1 + A/d_{\text{ñò max}}. \qquad (11)$$

Òîãäà $d_{\text{ä}} = d_{\text{ñò max}}\, k_{\text{ä}}$, ñëåäîâàòåëüíî:

$$s_{\text{ä}} = s_{\text{ñò}}\, k_{\text{ä}}. \qquad (12)$$

Òàêèì îáðàçîì, çàäà÷à íàõîæäåíèÿ äèíàìè÷åñêèõ íàïðÿæåíèé è ïðîâåðêà ïðî÷íîñòè ïðè êîëåáàíèÿõ ñâîäèòñÿ ê îïðåäåëåíèþ ñòàòè÷åñêèõ íàïðÿæåíèé è äèíàìè÷åñêîãî êîýôôèöèåíòà. Íî ïîñëåäíèé çàâèñèò îò àìïëèòóäû À, ïîýòîìó íàäî óìåòü íàõîäèòü íàèáîëüøåå çíà÷åíèå àìïëèòóäû.

Êàê èçâåñòíî, äèôôåðåíöèàëüíîå óðàâíåíèå äâèæåíèÿ êîëåáëþùåãîñÿ ãðóçà Q â ñëó÷àå ñâîáîäíûõ êîëåáàíèé èìååò âèä:

$$(Q/g)(d^2x/dt^2)+P–Q = (Q/g)(d^2x/dt^2) + P_1 = (Q/g)x''+cx = 0, \qquad (13)$$

ãäå x– êîîðäèíàòà, ïîëíîñòüþ îïðåäåëÿþùàÿ ïîëîæåíèå ãðóçà Q âî âðåìÿ êîëåáàíèé, ì;

P– ïîëíîå óïðóãîå ñîïðîòèâëåíèå ñèñòåìû ïðè êîëåáàíèÿõ, Í;

P – Q = P_1,– âîññòàíàâëèâàþùàÿ ñèëà (â ïðåäåëàõ óïðóãèõ äåôîðìàöèè Ð) ïðîïîðöèîíàëüíà êîîðäèíàòå x, Í;

c– коэффициент пропорциональности, представляющий собой усилие, необходимое для того, чтобы вызвать равную единице статическую деформацию системы в направлении действия груза Q, Н.

Åñëè ñòàòè÷åñêàÿ äåôîðìàöèÿ îò ãðóçà Q ðàâíà d_Q, òî ñ = Q/d_Q. Ðåøåíèå óðàâíåíèÿ (13) ïðèâîäèò ê ñëåäóþùèì ôîðìóëàì äëÿ âû÷èñëåíèÿ ÷àñòîòû w_o è ïåðèîäà t_o ñîáñòâåííûõ êîëåáàíèé:

$$w_o = \text{Ö}\overline{gc/Q}. \tag{14}$$

Ïîäñòàâèì â ôîðìóëó (10.14) çíà÷åíèå êîýôôèöèåíòà ñ:

$$w_o = \text{Ö}\overline{g/d_Q}. \tag{15}$$

Ïåðèîä ñîáñòâåííûõ êîëåáàíèé íàõîäèòñÿ ïî ôîðìóëå:

$$t_o = 2p/w_o = 2p\text{Ö}\overline{d_Q/g}. \tag{16}$$

Åñëè íà óïðóãóþ ñèñòåìó, êðîìå ãðóçà Q è ñèëû óïðóãîãî ñîïðîòèâëåíèÿ ñèñòåìû Ð, â òîì æå íàïðàâëåíèè äåéñòâóþò ïåðèîäè÷åñêè ìåíÿþùàÿñÿ âîçìóùàþùàÿ ñèëà S è ñèëà ñîïðîòèâëåíèÿ ñðåäû R, òî äèôôåðåíöèàëüíîå óðàâíåíèå êîëåáàòåëüíîãî äâèæåíèÿ áóäåò èìåòü âèä:

$$(Q/g)x'' + cx - S + R = 0. \tag{17}$$

Ñèëó R îïðåäåëÿþò ïî ôîðìóëå: R = ãõ'. Åñëè âîçìóùàþùàÿ ñèëà S ìåíÿåòñÿ ïî ñèíóñîèäàëüíîìó çàêîíó, òî

$$S = H \sin wt,$$

ãäå Í = S_{max},

w– ÷àñòîòà âîçìóùàþùåé ñèëû, ñåê$^{-1}$.

Òîãäà óðàâíåíèå (10.17) ïåðåïèøåòñÿ ñëåäóþùèì îáðàçîì: (Q/g) õ'' + rx' + ñõ = H sinwt, ðàçäåëèì ëåâóþ è ïðàâóþ ÷àñòè íà Q/g:

$$\text{õ}'' + (rg/Q)\,\text{õ}' + (cg/Q)\,\text{õ} = (gH/Q) \sin wt,$$

ãäå rg/Q = 2n– óäâîåííûé êîýôôèöèåíò çàòóõàíèÿ êîëåáàíèé;

cg/Q = w_o^2– ÷àñòîòà ñîáñòâåííûõ êîëåáàíèé [ñì. ôîðìóëó 14].

Ñ ó÷åòîì ýòîãî óðàâíåíèå (17) ïðèìåò âèä:

$$x'' + 2nx' + w_o^2 x = (gH / Q)\ \sin wt. \qquad (18)$$

Ðåøåíèå ýòîãî óðàâíåíèÿ ïðèâîäèò ê ñëåäóþùåìó âûðàæåíèþ äëÿ àìïëèòóäû À âûíóæäåííûõ êîëåáàíèé:

$$\text{À} = H / [(Q / g)\text{Ö}\,\overline{(w_o^2 - w^2)^2 + 4n^2 w^2}].$$

Â çíàìåíàòåëå èç ïîä êîðíÿ âûíåñåì w_o^2:

$$A = (gH / w_o^2 Q)\{1 / \text{Ö}\,\overline{[1 - (w^2 / w_o^2)^2]^2 + 4(n / w_o)^2 (w / w_o)^2}\};$$

Çäåñü $gH / w_o^2 Q = (gH / Q)(d_Q / g) = (H / Q)\ d_Q = d_H$ [ñì. ôîðìóëó 15],

ãäå d_H– ñòàòè÷åñêàÿ äåôîðìàöèÿ îò íàèáîëüøåé âåëè÷èíû çàòóõàþùåé ñèëû, ì.

Òîãäà

$$\text{À} = d_H / \text{Ö}\,\overline{[1 - (w^2 / w_o^2)^2]^2 + 4(n / w_o)^2 (w / w_o)^2}.$$

Ðàçäåëèâ ëåâûå è ïðàâûå ÷àñòè ýòîãî óðàâíåíèÿ íà d_H, ïîëó÷èì значение коэффициента нарастания колебаний:

$$b = A / d_H = 1 / \text{Ö}\,\overline{[1 - (w^2 / w_o^2)^2]^2 + 4(n / w_o)^2 (w / w_o)^2}. \qquad (19)$$

Òîãäà ôîðìóëà (10.11) ïðèìåò âèä:

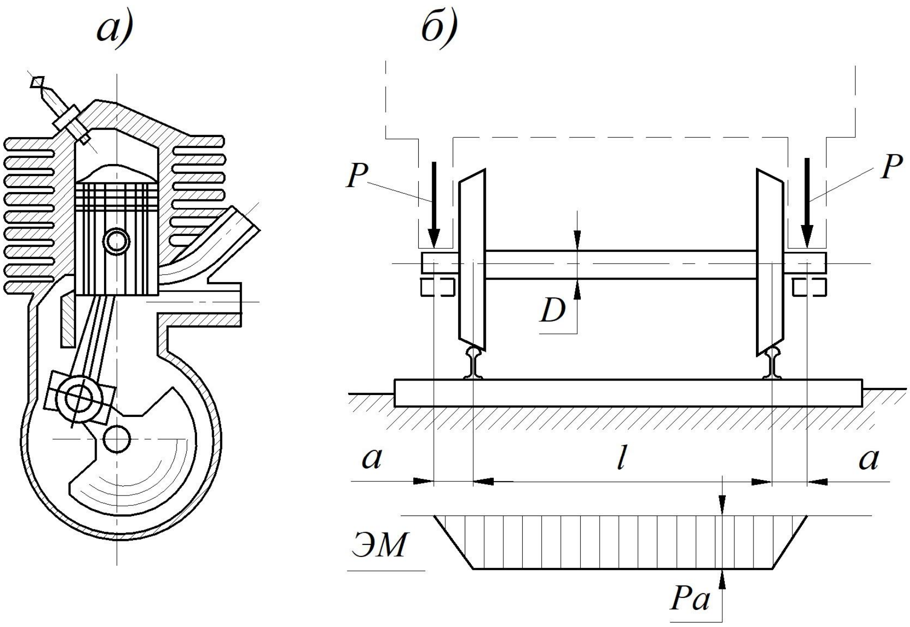
$$k_{\text{ä}} = 1 + A / d_{\text{ñò max}} = 1 + (d_H / d_Q)\ b. \qquad (20)$$

Âèäíî, ÷òî ðàññìîòðåííàÿ çàäà÷à ñâîäèòñÿ ê îïðåäåëåíèþ äåôîðìàöèé îò âîçìóùàþùåé ñèëû S è ñèëû Q ïðè èõ ñòàòè÷åñêîì ïðèëîæåíèè è êîýôôèöèåíòà íàðàñòàíèÿ êîëåáàíèé b. Îáû÷íî åãî íàõîäÿò ñ ïîìîùüþ ãðàôèêîâ â çàâèñèìîñòè îò ñîîòíîøåíèÿ ïåðèîäîâ âûíóæäåííûõ è ñâîáîäíûõ êîëåáàíèé.

6. Ïðî÷íîñòü ïðè ïåðåìåííûõ íàãðóçêàõ

Êðîìå âðåìåííûõ èëè ïîñòîÿííûõ íàãðóçîê, íà ýëåìåíòû êîíñòðóêöèé ìîãóò äåéñòâîâàòü *ïåðåìåííûå íàãðóçêè*. Ïåðåìåííûìè íàçûâàþòñÿ òàêèå íàãðóçêè, êîòîðûå ïðèêëàäûâàþòñÿ ê òåëó ìíîãîêðàòíî, êàæäûé ðàç, ìåíÿÿñü îò ñâîåãî ìèíèìàëüíîãî äî ìàêñèìàëüíîãî çíà÷åíèÿ.

Ïåðèîä âðåìåíè, â òå÷åíèå êîòîðîãî íàãðóçêà ìåíÿåòñÿ îò ñâîåãî ìàêñèìóìà äî ñâîåãî ìèíèìóìà, íàçûâàåòñÿ *öèêëîì.* Â òàêèõ óñëîâèÿõ ðàáîòàþò ìíîãèå äåòàëè ìàøèí. Íàïðèìåð, äåòàëè êðèâîøèïíî–øàòóííîãî ìåõàíèçìà äâèãàòåëÿ âíóòðåííåãî ñãîðàíèÿ íàõîäÿòñÿ ïîä äåéñòâèåì ïåðèîäè÷åñêè ìåíÿþùèõñÿ ñèë (Ðèñ.9,à).



Îñü âàãîíà, âðàùàþùàÿñÿ âìåñòå ñ êîëåñàìè, èñïûòûâàåò öèêëè÷åñêè èçìåíÿþùèåñÿ íàïðÿæåíèÿ, õîòÿ âíåøíèå ñèëû ñîõðàíÿþò ñâîþ âåëè÷èíó. Ïðîèñõîäèò ýòî â ðåçóëüòàòå òîãî, ÷òî ÷àñòè îñè, ëåæàùèå âûøå èëè íèæå íåéòðàëüíîãî ñëîÿ, ïîïåðåìåííî îêàçûâàþòñÿ òî â ðàñòÿíóòîé, òî â ñæàòîé çîíå. *Ýïþðà èçãèáàþùèõ ìîìåíòîâ ïîêàçàíà íà ðèñóíêå* (Ðèñ. 9, á).

Íàãëÿäíî ýòîò ïðîöåññ ìîæíî ïðåäñòàâèòü â âèäå ìíîãîêðàòíîãî èçãèáà êóñêà ïðîâîëîêè.

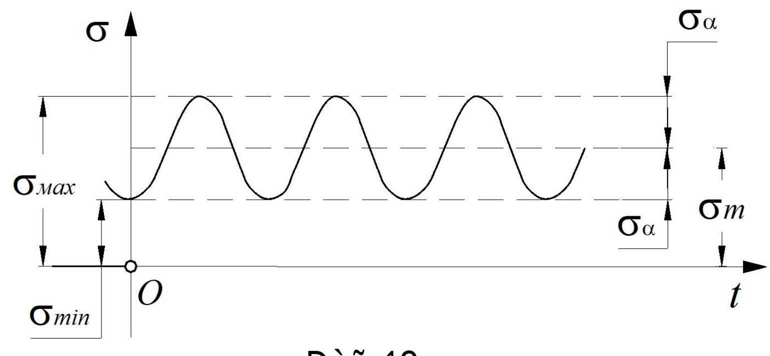
Ïðè ïåðåìåííûõ íàïðÿæåíèÿõ ïîñëå íåêîòîðîãî ÷èñëà öèêëîâ ìîæåò íàñòóïèòü ðàçðóøåíèå äåòàëè, â òî âðåìÿ êàê ïðè òîì æå íåèçìåííîì âî âðåìåíè íàïðÿæåíèè ðàçðóøåíèÿ íå ïðîèñõîäèò.

Ïîñëå ðàçðóøåíèÿ íà ïîâåðõíîñòè èçëîìà äåòàëè îáíàðóæèâàþòñÿ äâå çîíû. Â îäíîé çîíå ìèêðîïîâåðõíîñòü ñãëàæåíà, à â äðóãîé âèäíû ïðèçíàêè ñâåæåãî ðàçðóøåíèÿ. Äî îïðåäåëåííîãî âðåìåíè ñ÷èòàëîñü, ÷òî òàêîå ðàçðóøåíèå ñâÿçàíî ñ èçìåíåíèåì êðèñòàëëè÷åñêîé ñòðóêòóðû ìåòàëëà. Ïîÿâèëñÿ òåðìèí *óñòàëîñòü ìåòàëëà.* È äî ñèõ ïîð ïðî÷íîñòü òàêèõ äåòàëåé íàçûâàþò *óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòüþ.*

Ñ ðàçâèòèåì íàóêè áûëî óñòàíîâëåíî, ÷òî â çîíå ðàçðóøåíèÿ îáðàçóåòñÿ ìèêðîòðåùèíà, êîòîðàÿ ïðè ìíîãîêðàòíîì èçìåíåíèè íàïðÿæåíèé ñïîñîáíà ïðîíèêàòü â ãëóáü òåëà. Ïîâåðõíîñòè, ñîïðèêàñàþùèåñÿ â çîíå òðåùèíû, èñïûòûâàþò êîíòàêòíîå âçàèìîäåéñòâèå, â ðåçóëüòàòå ÷åãî êðèñòàëëû èñòèðàþòñÿ, à ïîâåðõíîñòè ïðèîáðåòàþò âèä, ïîêàçàííûé âûøå íà ðèñóíêå. Â ðåçóëüòàòå ðàçâèòèÿ òðåùèíû ñå÷åíèå îñëàáëÿåòñÿ è ïðîèñõîäèò âíåçàïíîå ðàçðóøåíèå äåòàëè.

Ïðîöåññû, ïðîèñõîäÿùèå â äåòàëè ïðè çíàêîïåðåìåííûõ íàïðÿæåíèÿõ, âî ìíîãîì è äî ñèõ ïîð íå èçó÷åíû, òàê êàê äëÿ ñîçäàíèÿ äîñòàòî÷íî ñòðîéíîé òåîðèè óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòè íåîáõîäèìî ïðîíèêíóòü â îñîáåííîñòè ñòðîåíèÿ êðèñòàëëîâ è ìåæêðèñòàëëè÷åñêèõ ñâÿçåé. Ýòèìè âîïðîñàìè çàíèìàåòñÿ íàóêà, êîòîðóþ íàçûâàþò *"Ôèçèêà òâåðäîãî òåëà".*

Ðàññìîòðèì èçìåíåíèå íàïðÿæåíèé âî âðåìåíè (Ðèñ. 10), êîòîðûå ïðè çíàêîïåðåìåííîì íàãðóæåíèè ìåíÿþòñÿ ïî çàêîíó ñèíóñîèäû.



Ðèñ 10

Íàèáîëüøåå è íàèìåíüøåå íàïðÿæåíèÿ öèêëà îáîçíà÷èì ÷åðåç s_{max} è s_{min}. Îòíîøåíèå ìèíèìàëüíîãî íàïðÿæåíèÿ ê ìàêñèìàëüíîìó íàçûâàþò *êîýôôèöèåíòîì àñèììåòðèè öèêëà.*

$$r = s_{min} / s_{max}. \qquad (21)$$

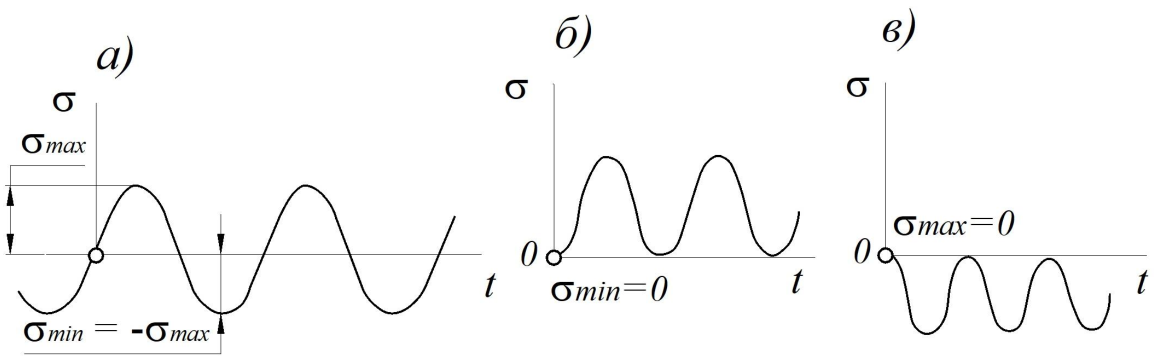
Ïîëîâèíó ñóììû ìàêñèìàëüíîãî è ìèíèìàëüíîãî íàïðÿæåíèé íàçûâàþò *ñðåäíèì íàïðÿæåíèåì öèêëà.*

$$s_m = s_{max} – (s_{min} / 2). \qquad (22)$$

Ïîëîâèíó ðàçíîñòè ìåæäó ìàêñèìàëüíûì è ìèíèìàëüíûì íàïðÿæåíèÿìè íàçûâàþò *àìïëèòóäîé öèêëà.*

$$s_a = s_{max} + s_{min} / 2. \qquad (23)$$

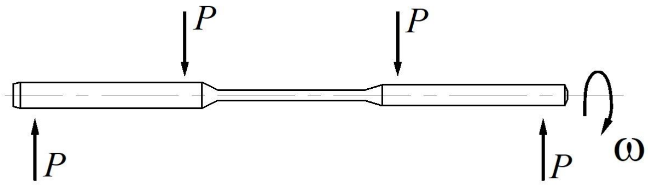
Ðàññìîòðåííûé íàìè ñëó÷àé ÿâëÿåòñÿ *íåñèììåòðè÷íûì öèêëîì íàãðóæåíèÿ.* Îí õàðàêòåðèçóåòñÿ òåì, ÷òî s_{max} ¹ s_{min}. Â ñëó÷àå, êîãäà $s_{max} = –s_{min}$, à êîýôôèöèåíò àñèììåòðèè öèêëà r = – 1, îí íàçûâàåòñÿ *ñèììåòðè÷íûì* (Ðèñ. 11, à). Åñëè $s_{max} = 0$ èëè $s_{min} = 0$, öèêë íàçûâàþò *ïóëüñàöèîííûì* (Ðèñ. 11, á).



Ðèñ. 11

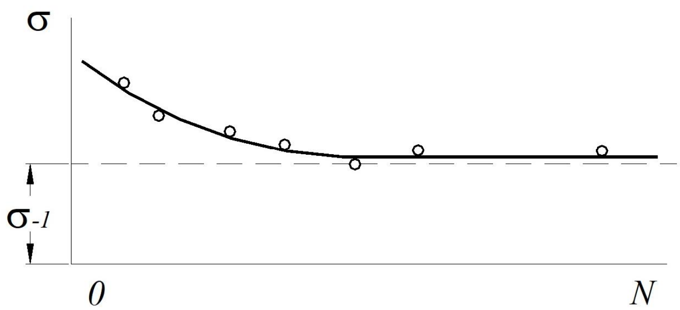
Äëÿ ïóëüñàöèîííîãî öèêëà êîýôôèöèåíò àñèììåòðèè öèêëà ã=0. Ñèììåòðè÷íûé öèêë èìååò ìåñòî, íàïðèìåð, ïðè ðàáîòå âàãîííîé îñè. Ïðèìåðîì ïóëüñàöèîííîãî öèêëà ÿâëÿåòñÿ íàãðóæåíèå çóáüåâ øåñòåðíè â ðåäóêòîðàõ èëè êîðîáêàõ ïåðåäà÷.

Óñòàëîñòíóþ ìåõàíè÷åñêóþ õàðàêòåðèñòèêó îïðåäåëÿþò ïóòåì ñïåöèàëüíûõ èñïûòàíèé. Íàèáîëåå ðàñïðîñòðàíåííûìè ÿâëÿþòñÿ èñïûòàíèÿ â óñëîâèÿõ ñèììåòðè÷íîãî öèêëà íàãðóæåíèÿ. Ïðè ýòîì èñïîëüçóåòñÿ ïðèíöèï ÷èñòîãî èçãèáà âðàùàþùåãîñÿ îáðàçöà (Ðèñ.12).



Ðèñ. 12

Ïóòåì ìíîãîêðàòíûõ èñïûòàíèé ìîæíî îïðåäåëèòü ÷èñëî öèêëîâ, êîòîðîå âûäåðæèâàåò îáðàçåö äî ðàçðóøåíèÿ, â çàâèñèìîñòè îò âåëè÷èíû ìàêñèìàëüíîãî íàïðÿæåíèÿ. Ýòà çàâèñèìîñòü èìååò âèä êðèâîé *Âåëåðà* (Ðèñ. 13).



Ðèñ. 13

Íàèáîëüøåå ìàêñèìàëüíîå íàïðÿæåíèå, ïðè êîòîðîì îáðàçåö íå ðàçðóøàåòñÿ ïðè íåîãðàíè÷åííî áîëüøîì öèêëå íàãðóæåíèé, íàçûâàåòñÿ *ïðåäåëîì âûíîñëèâîñòè* s_{-1}. Èíäåêñ ñîîòâåòñòâóåò êîýôôèöèåíòó àñèììåòðèè ñèììåòðè÷íîãî öèêëà íàãðóæåíèÿ.

Äëÿ èñïûòàíèé íà óñòàëîñòü õàðàêòåðåí áîëüøîé ðàçáðîñ ýêñïåðèìåíòàëüíûõ òî÷åê. Ïîýòîìó äëÿ äîñòîâåðíîãî îïðåäåëåíèÿ ïðåäåëà âûíîñëèâîñòè òðåáóåòñÿ èñïûòàíèå áîëüøîãî ÷èñëà îáðàçöîâ (äî 60) ñ ïîñëåäóþùåé ñòàòèñòè÷åñêîé îáðàáîòêîé ðåçóëüòàòîâ, ÷òî ÿâëÿåòñÿ äîñòàòî÷íî òðóäîåìêîé îïåðàöèåé. Â ñâÿçè ñ ýòèì ÷àñòî ïðåäåë âûíîñëèâîñòè ñâÿçûâàþò ýìïèðè÷åñêèìè çàâèñèìîñòÿìè ñ ïðåäåëîì ïðî÷íîñòè s_{B}.

Äëÿ ñòàëè ýòà çàâèñèìîñòü èìååò âèä:

$$s_{-1} \text{ » } (0,4...0,5)s_{B}. \qquad (24)$$

Äëÿ âûñîêîïðî÷íûõ ñòàëåé ìîæíî ïðèíÿòü:

$$s_{-1} = 400 + (1/6)s_{B}. \qquad (25)$$

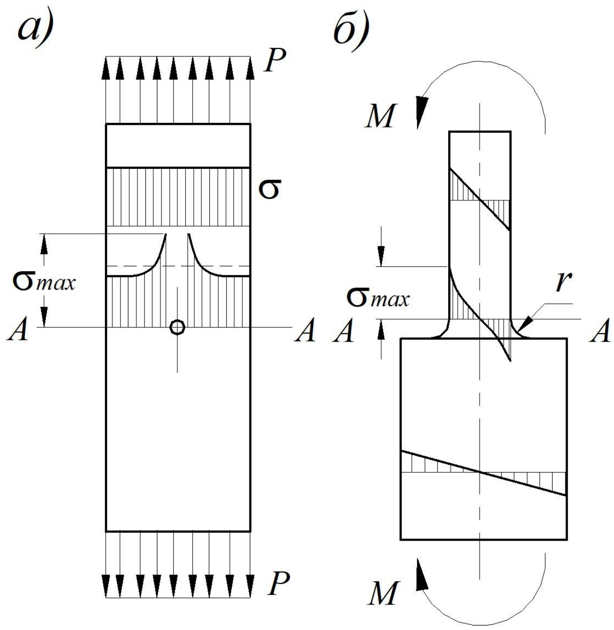
Äëÿ öâåòíûõ ìåòàëëîâ ïðåäåë âûíîñëèâîñòè èçìåíÿåòñÿ â áîëåå øèðîêèõ ïðåäåëàõ:

$$s_{-1} = (0,25...0,5)s_{B}. \qquad (26)$$

Íà âåëè÷èíó ïðåäåëà âûíîñëèâîñòè âëèÿþò òðè îñíîâíûõ ôàêòîðà: *1. Êîíöåíòðàöèÿ íàïðÿæåíèé; 2. Ñîñòîÿíèå ïîâåðõíîñòè äåòàëè; 3. Ðàçìåðû äåòàëè.*

Ìíîãî÷èñëåííûå òåîðåòè÷åñêèå è ýêñïåðèìåíòàëüíûå èññëåäîâàíèÿ ïîêàçûâàþò, ÷òî â îáëàñòè ðåçêèõ èçìåíåíèé â ôîðìå äåòàëè (âõîäÿùèå óãëû, îòâåðñòèÿ, âûòî÷êè) âîçíèêàþò ïîâûøåííûå íàïðÿæåíèÿ.

Íàïðèìåð, ïðè ðàñòÿæåíèè ïîëîñû ñ îòâåðñòèåì (Ðèñ. 14, à), çàêîí ðàâíîìåðíîãî ðàñïðåäåëåíèÿ âáëèçè îòâåðñòèÿ íàðóøàåòñÿ. Àíàëîãè÷íî ïðè èçãèáå ñòóïåí÷àòîãî ñòåðæíÿ (Ðèñ. 14, á) â çîíå âõîäÿùåãî óãëà âîçíèêàåò ïîâûøåííîå íàïðÿæåíèå, âåëè÷èíà êîòîðîãî çàâèñèò îò ðàäèóñà çàêðóãëåíèÿ ã.



Ðèñ. 14

Ïîäîáíûõ ïðèìåðîâ ìîæíî ïðèâåñòè ìíîãî. Èçâåñòíû êàòàñòðîôû êðóïíûõ ñóäîâ, êîòîðûå ïðîèçîøëè èç–çà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé âîêðóã ëþêîâ, èëëþìèíàòîðîâ è ïðî÷èõ îòâåðñòèé â èõ êîðïóñàõ. Â 60–õ ãîäàõ íàøåãî ñòîëåòèÿ àíãëèéñêèé ðåàêòèâíûé ñàìîëåò "Êîìåòà" ðàçâàëèëñÿ â âîçäóõå èç–çà òîãî, ÷òî îí áûë çàïðîåêòèðîâàí ñ ïðÿìîóãîëüíûìè èëëþìèíàòîðàìè, òàê êàê ýòî äåëàëîñü è äî ðåàêòèâíîé àâèàöèè. Â óãëàõ ïðÿìîóãîëüíûõ èëëþìèíàòîðîâ îáðàçîâûâàëèñü î÷åíü áîëüøèå êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé. Êîãäà èëëþìèíàòîðû âûïîëíèëè êðóãëûìè, ñàìîëåòû ñòàëè ëåòàòü íîðìàëüíî.

Îïèñàííàÿ îñîáåííîñòü ðàñïðåäåëåíèÿ íàïðÿæåíèé ïîëó÷èëà íàçâàíèå *êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé*. Â ñâÿçè ñ ëîêàëüíûì õàðàêòåðîì ðàñïðåäåëåíèÿ ýòè íàïðÿæåíèÿ íîñÿò íàçâàíèå *ìåñòíûõ íàïðÿæåíèé*. Îñíîâíûì ïîêàçàòåëåì ìåñòíûõ íàïðÿæåíèé ÿâëÿåòñÿ òåîðåòè÷åñêèé êîýôôèöèåíò êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé.

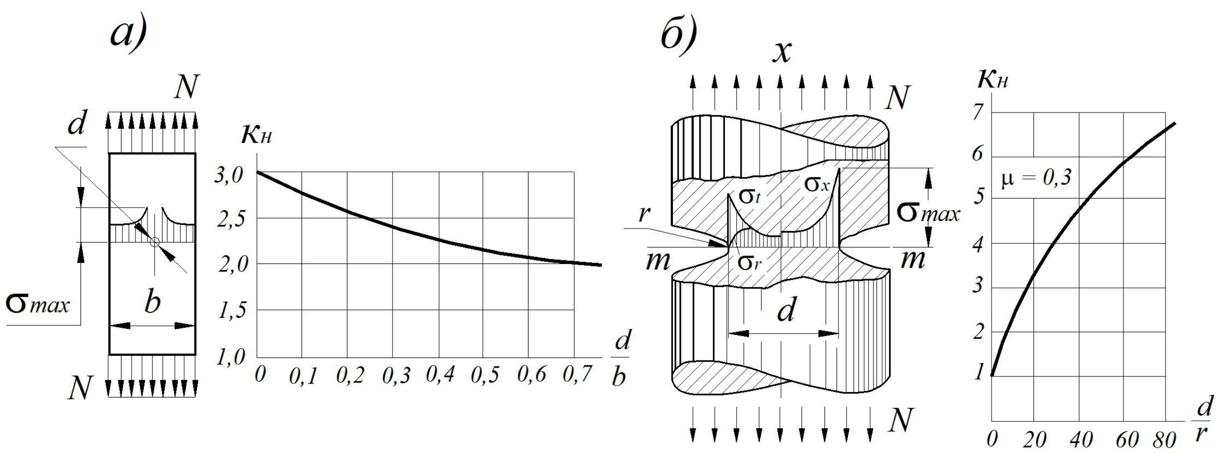
$$k_T = s_{max} / s_{íîì}, \qquad (27)$$

ãäå s_{max}– íàèáîëüøåå ìåñòíîå íàïðÿæåíèå, Ïà;

$s_{íîì}$– íîìèíàëüíîå íàïðÿæåíèå, êîòîðîå îïðåäåëÿåòñÿ ïî ôîðìóëàì ñîïðîòèâëåíèÿ ìàòåðèàëîâ, áåç ó÷åòà ýôôåêòà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé ïî íàèáîëåå îñëàáëåííîìó ñå÷åíèþ äåòàëè: $s_{íîì} = P/F_{AA,}$ Ïà.

Âåëè÷èíà òåîðåòè÷åñêîãî êîýôôèöèåíòà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé îïðåäåëåíà äëÿ áîëüøèíñòâà ýëåìåíòîâ ìàøèí è ìåõàíèçìîâ, âñòðå÷àþùèõñÿ íà ïðàêòèêå.

Íà ðèñóíêå ïîêàçàíà çàâèñèìîñòü òåîðåòè÷åñêîãî êîýôôèöèåíòà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé îò ðàçìåðîâ ïîëîñû ñ îòâåðñòèåì (Ðèñ.15, à) è âàëà ñ âûòî÷êîé (Ðèñ. 15, á).



Ðèñ. 15

Ïðè çíàêîïåðåìåííîì íàãðóæåíèè ââîäèòñÿ ïîíÿòèå *ýôôåêòèâíîãî êîýôôèöèåíòà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé* k_{-1}:

$$k_{-1}= s_{-1}/s^{ä}_{-1}, \qquad (28)$$

ãäå s_{-1}– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè ãëàäêîãî îáðàçöà, Ïà;
$s^{ä}_{-1}$– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè îáðàçöà ñ êîíöåíòðàòîðîì íàïðÿæåíèé, Ïà.

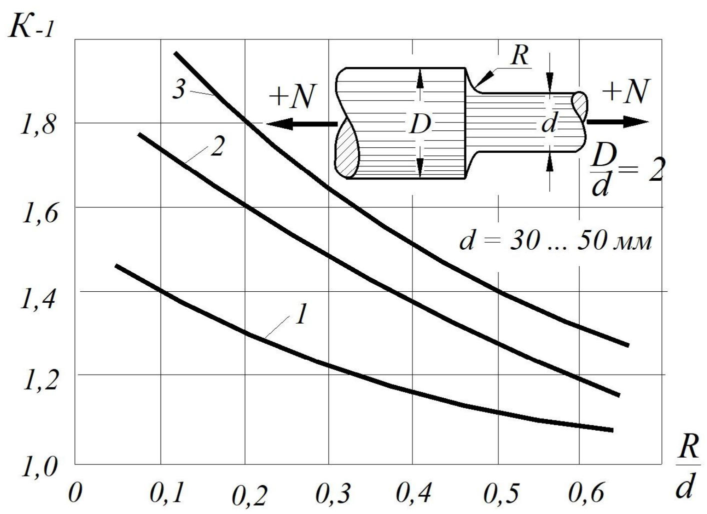
Âåëè÷èíà ýôôåêòèâíîãî êîýôôèöèåíòà êîíöåíòðàöèè äåòàëåé îïðåäåëÿåòñÿ ïðè ïîìîùè óñòàëîñòíûõ èñïûòàíèé. Íàêîïëåííûå ýêñïåðèìåíòàëüíûå äàííûå ïîçâîëèëè óñòàíîâèòü ñëåäóþùóþ çàâèñèìîñòü ìåæäó ýôôåêòèâíûì è òåîðåòè÷åñêèì êîýôôèöèåíòàìè êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé:

$$k_{-1} = 1+ q(k_T -1),$$

ãäå q– êîýôôèöèåíò ÷óâñòâèòåëüíîñòè ìàòåðèàëà ê ìåñòíûì íàïðÿæåíèÿì.

Ýòîò êîýôôèöèåíò çàâèñèò îò ñâîéñòâ ìàòåðèàëà. Äëÿ ëåãèðîâàííûõ ñòàëåé åãî âåëè÷èíà áëèçêà ê åäèíèöå, à äëÿ îáû÷íûõ êîíñòðóêöèîííûõ ñòàëåé q = 0,6...0,8. Äëÿ ÷óãóíà q áëèçîê ê íóëþ.

Äëÿ îïðåäåëåíèÿ k_{-1} èñïîëüçóþòñÿ ãðàôèêè, ïîñòðîåííûå ïî ðåçóëüòàòàì óñòàëîñòíûõ èñïûòàíèé (Ðèñ. 16).



Ðèñ. 16

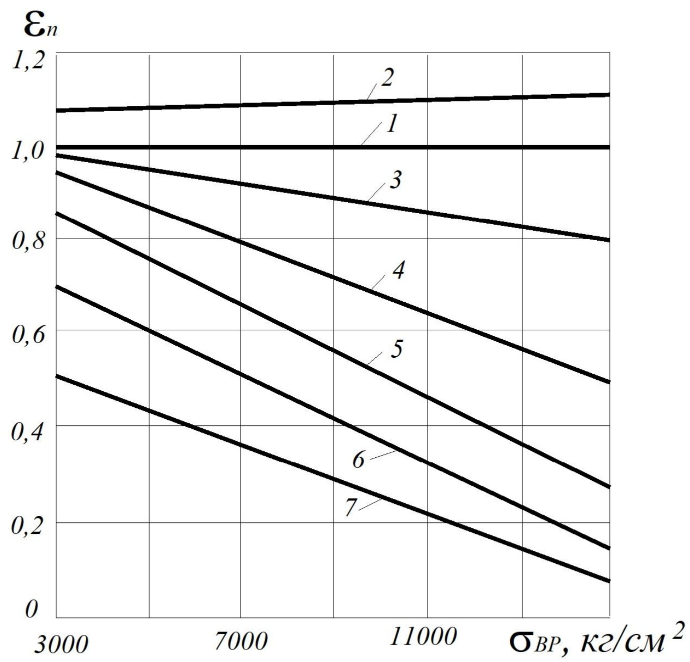
Ãðàôèê äàåò çíà÷åíèÿ ýôôåêòèâíîãî êîýôôèöèåíòà êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé äëÿ ñòàëüíîãî ñòóïåí÷àòîãî ñòåðæíÿ ïðè ðàñòÿæåíèè èëè ñæàòèè. Êðèâûå 1, 2 è 3 äàíû äëÿ ñòàëåé ñ ïðåäåëàìè ïðî÷íîñòè 400, 800 è 1200 ÌÏà.

Òàê êàê ïðè öèêëè÷åñêèõ íàïðÿæåíèÿõ íà÷àëî ðàçðóøåíèÿ ñâÿçàíî ñ îáðàçîâàíèåì òðåùèíû, áîëüøóþ ðîëü â óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòè äåòàëè èãðàåò ñîñòîÿíèå åå ïîâåðõíîñòè. Î÷åâèäíî, ÷òî â ñëó÷àå ÷èñòîé è òîíêî îáðàáîòàííîé ïîâåðõíîñòè ïðåäåë âûíîñëèâîñòè âîçðàñòàåò. Ïðè ãðóáîé îáðàáîòêå íàëè÷èå ìåëêèõ ïîâåðõíîñòíûõ äåôåêòîâ ïðèâîäèò ê ñíèæåíèþ ïðåäåëà âûíîñëèâîñòè. Ýòè îñîáåííîñòè, ñâÿçàííûå ñ îáðàáîòêîé ïîâåðõíîñòè ó÷èòûâàþòñÿ *êîýôôèöèåíòîì êà÷åñòâà ïîâåðõíîñòè* äåòàëè e_n:

$$e_n = s_{-1n} / s_{-1}, \qquad (29)$$

ãäå s_{-1}– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè îáðàçöîâ, îáðàáîòàííûõ øëèôîâàíèåì, Ïà; $s_{-1ï}$– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè äëÿ îáðàçöîâ, ñîñòîÿíèå ïîâåðõíîñòè êîòîðûõ ñîîòâåòñòâóåò ñîñòîÿíèþ ïîâåðõíîñòè ðàñ÷èòûâàåìîé äåòàëè, Ïà.

Íà ðèñóíêå 17 ïðèâåäåí ãðàôèê äëÿ îïðåäåëåíèÿ e_n.



Ðèñ. 17

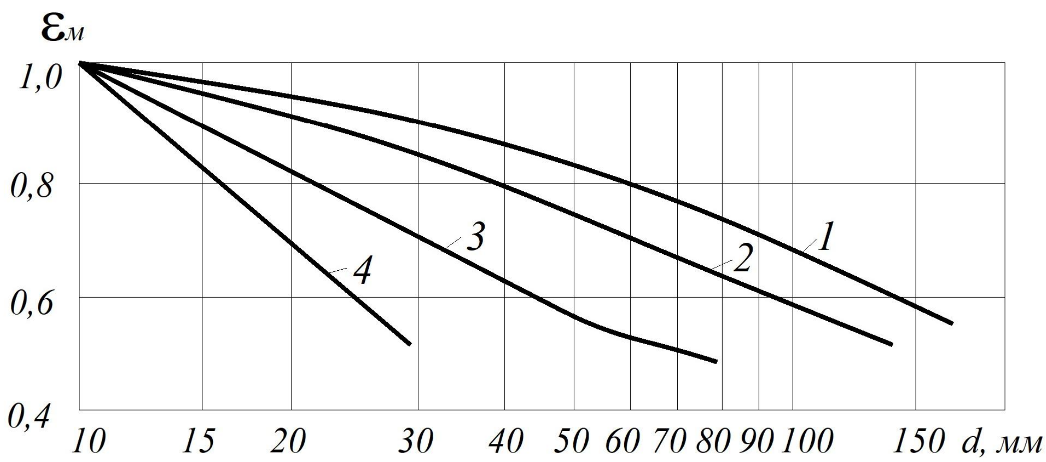
Êîýôôèöèåíò êà÷åñòâà äëÿ øëèôîâàííûõ îáðàçöîâ ïðèíÿò çà 1 (Ðèñ. 17, ïðÿìàÿ 1). Ïðÿìàÿ 2 îòíîñèòñÿ ê îáðàçöàì ñ ïîëèðîâàííîé ïîâåðõíîñòüþ. Ïðÿìàÿ 3– ê îáðàçöàì, èìåþùèì ïîâåðõíîñòü, îáðàáîòàííóþ ðåçöîì. Ïðÿìàÿ 4 äàåò çíà÷åíèÿ êîýôôèöèåíòà êà÷åñòâà ïîâåðõíîñòè, èìåþùåé ìåëêóþ íàñå÷êó, à 5– îòíîñèòñÿ ê ïîâåðõíîñòè, íå îáðàáîòàííîé ïîñëå ïðîêàòà. Äëÿ ïîâåðõíîñòåé, êîððîçèðîâàííûõ â ïðåñíîé è ìîðñêîé âîäå, çíà÷åíèÿ e_n çàäàþòñÿ ïðÿìûìè 6 è 7.

Ïðè ðàñ÷åòå äåòàëåé íà óñòàëîñòíóþ ïðî÷íîñòü íåîáõîäèìî ó÷èòûâàòü òàêæå *ìàñøòàáíûé ôàêòîð,* òàê êàê ñ óâåëè÷åíèåì ðàçìåðîâ äåòàëè ïðåäåë âûíîñëèâîñòè óìåíüøàåòñÿ. Ýòî ñâÿçàíî ñ òåì, ÷òî ïðè óâåëè÷åíèè ðàçìåðîâ äåòàëè âîçðàñòàåò âåðîÿòíîñòü ïîïàäàíèÿ ñòðóêòóðíûõ äåôåêòîâ â îáëàñòü ïîâûøåííûõ íàïðÿæåíèé, â ðåçóëüòàòå ÷åãî âîçðàñòàåò âåðîÿòíîñòü âîçíèêíîâåíèÿ òðåùèíû. Äëÿ ó÷åòà ìàñøòàáíîãî ôàêòîðà ââîäèòñÿ *êîýôôèöèåíò ìàñøòàáíîãî ôàêòîðà.*

$$e_{\text{ì}} = s_{-1\text{ä}} / s_{-1}, \tag{30}$$

ãäå $s_{-1\text{ä}}$– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè äåòàëè, Ïà;
s_{-1}– ïðåäåë âûíîñëèâîñòè îáðàçöîâ ñòàíäàðòíîãî ðàçìåðà (d = 8...12 ìì), Ïà.

Íà ðèñóíêå 18 ïðèâåäåí ãðàôèê çàâèñèìîñòè $e_{\text{ì}}$ îò äèàìåòðà âàëà äëÿ ñëó÷àÿ ñîâìåñòíîãî äåéñòâèÿ êðó÷åíèÿ è èçãèáà.



Ðèñ 18

Êðèâàÿ 1 (Ðèñ. 18) ïîëó÷åíà äëÿ óãëåðîäèñòîé ñòàëè ïðè îòñóòñòâèè êîíöåíòðàòîðîâ íàïðÿæåíèé. Ëåãèðîâàííóþ ñòàëü õàðàêòåðèçóåò êðèâàÿ 2 ïðè îòñóòñòâèè ìåñòíûõ íàïðÿæåíèé. Êðèâàÿ 3 îòíîñèòñÿ ê ëåãèðîâàííîé ñòàëè ïðè íàëè÷èè êîíöåíòðàöèè íàïðÿæåíèé, à 4– ê ñòàëÿì, èìåþùèì âûñîêóþ ñòåïåíü êîíöåíòðàöèè.

Âñå ïåðå÷èñëåííûå ôàêòîðû ó÷èòûâàþòñÿ ïðè îïðåäåëåíèè êîýôôèöèåíòà çàïàñà ïðî÷íîñòè. Ïðè äåéñòâèè òîëüêî íîðìàëüíûõ íàïðÿæåíèé åãî îïðåäåëÿþò ïî ôîðìóëå:

$$n_{s} = s_{-1} / [(k_{-1} / e_{M}e_{n}) s_{\text{à}} + (s_{-1} / s_{B}) s_{m}]. \qquad (31)$$

Ïðè ÷èñòîì ñäâèãå êîýôôèöèåíò çàïàñà ïðî÷íîñòè íàõîäÿò ïî ôîðìóëå:

$$n_{t} = t_{-1} / [(k_{-1} / e_{M}e_{n}) t_{\text{à}} + (t_{-1} / t_{B}) t_{m}]. \qquad (32)$$

Øèðîêîå ïðèìåíåíèå â ïðàêòè÷åñêèõ ðàñ÷åòàõ íàøëà ôîðìóëà *Ãàôà* è *Ïîëëàðäà:*

$$1 / n_{r}^{2} = 1 / n_{s}^{2} + 1 / n_{t}^{2}, \qquad (33)$$

ãäå n_{r}– êîýôôèöèåíò çàïàñà óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòè;

n_{s}– êîýôôèöèåíò çàïàñà óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòè â ïðåäïîëîæåíèè, ÷òî êàñàòåëüíûå íàïðÿæåíèÿ t îòñóòñòâóþò;

n_{t}– êîýôôèöèåíò çàïàñà óñòàëîñòíîé ïðî÷íîñòè â ïðåäïîëîæåíèè, ÷òî íîðìàëüíûå íàïðÿæåíèÿ îòñóòñòâóþò.