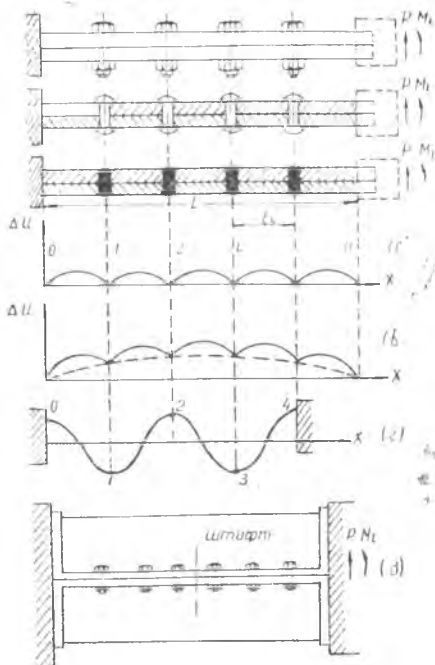


В. П. ФИЛЁКИН

## ЖЕСТКОСТЬ И ДЕМПФИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЫКОВ С УЧЕТОМ ПОДАТЛИВОСТИ СКРЕПЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

На величину изгибной жесткости и демпфирующую способность фланцевых и шовных соединений решающее влияние оказывает распределение скольжений в стыках этих соединений. В общем случае стыки (фиг. 1) фланцевых и шовных соединений связаны специальными деталями (болты, штифты, заклепки, сварка и т. д.). Распределение скольжений в стыке зависит от граничных условий (условий вхождения стыка в конструкцию), а также от жесткости и размещения скрепляющих элементов. Например, в горизонтальном фланцевом соединении корпуса газотурбинного двигателя (фиг. 1, д) скольжения по концам фланцевого соединения отсутствуют вследствие жесткого соединения корпуса со смежными узлами, что может быть учтено в отображающем стыке — составном стержне (фиг. 1, а) постановкой жестких захватов на концах.



Фиг. 1.

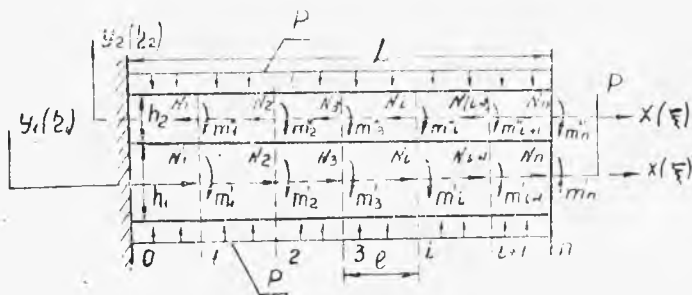
При распространении скольжений не на всю длину (фиг. 1, б) между скрепляющими элементами, последние играют роль абсолютно жестких [3]. Аналогичное распределение скольжений имеет место и при колебаниях стыка по высшим формам (фиг. 1, г). В этом случае скольжения отсутствуют в местах пучностей [2], которые играют роль абсолютно жестких связей.

Во многих случаях скрепляющие элементы попадают в зону скольжения и, обладая упругой податливостью, изменяют распределение скольжений (фиг. 1, в).

### ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ

Рассмотрим фланцевый стык (фиг. 2), в котором скрепляющие элементы в сечениях 1, 2 ...  $i$  ...  $n$  обладают сдвиговой жесткостью  $C_c$ . Стык сдавливается равномерными погонными усилиями  $\rho v$  и деформируется силой  $P$  на конце ( $x = L$ ).

Основные размеры стыка приведены на фиг. 2, а обозначения те же, что и в [2, 3].



Фиг. 2.

От скрепляющих элементов в месте их расположения на стержни  $h_1$  и  $h_2$  будут действовать системы сил  $N_1 \dots N_i \dots N_n$  в направлении оси каждого стержня и моменты  $m_i'$  на стержень  $h_1$  и  $m_i''$  — на стержень  $h_2$ .

Из условия прилегания обеих половин стыка по контактирующей поверхности можно получить соотношение между моментами  $m_i'$  и  $m_i''$ .

$$m_i'' = \Delta^3 m_i' \quad (1)$$

Из условия равновесия отсеченной ( $i - n$ ) части стыка получим соотношение между силами  $N_i$  и моментами  $m_i'$  и  $m_i''$ .

$$m_i' = \frac{h_0}{2(1 + \Delta^3)} N_i ; \quad m_i'' = \frac{\Delta^3 h_0}{2(1 + \Delta^3)} N_i \quad (2)$$

Для определения жесткости стыка выявим зависимость прогиба  $v_L$  конца стержня от деформирующей силы  $P$  в фазе скольжения. Прогиб конца стыка получим путем сложения прогиба  $v_1$  составного стержня в фазе скольжения при отсутствии скрепляющих

элементов [1] с прогибом  $v_{1 \text{ доп.}}$  полосы  $h_1$  (или  $h_2$ , что одно и то же), вызванным системой сил  $N_1 \dots N_i$  и моментов  $m_1' \dots m_i'$ .

$$v_L = v_1 + v_{1 \text{ доп.}} \quad (3)$$

Дополнительный прогиб (при  $y_1 = +\frac{h_1}{2}$  и  $x = L$ ), запишется:

$$v_{1 \text{ доп.}} = -\frac{3}{eE\lambda^2 b} \left[ 2 \sum_{j=1}^n (n+1-j) \sum_{i=j}^n N_i - \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n N_i \right]. \quad (4)$$

Систему сил  $N_i$  определим из рассмотрения величин скольжений в местах расположения скрепляющих элементов (фиг. 2, сечения  $1 \dots i \dots n$ ).

$$N_i = \frac{3\mu p b l}{2 c e (1-e)} [(1-e)r - 1] (2ni - i^2) - \frac{3}{c e (1-e)} \sum_{j=1}^i \sum_{\kappa=j}^n N_{\kappa}, \quad (5)$$

$$(i = 1 \dots n).$$

Решение системы (5) с помощью теоремы Крамера представляет собой громоздкую операцию вследствие сложного вычисления определителя. Кроме того, для определения прогиба по выражению (4), как нетрудно показать, и не требуется вычисления всех значений системы сил  $N_i$ .

Введя обозначения:  $\Delta_n = \sum_{i=1}^n N_i$ ;  $\bar{c} = \frac{E\lambda b}{c_e}$ ;

$$\beta = \frac{3}{c e (1-e)}; \quad \alpha_i = 2ni - i^2; \quad B = \frac{3\mu p b l}{2 \bar{c} e (1-e)} [(1-e)r - 1], \quad (6)$$

$$\alpha_i' = B\alpha_i;$$

выражение (4) запишем в виде:

$$v_{1 \text{ доп.}} = -\frac{3}{eE\lambda^2 b} \left[ \frac{2}{\beta} \left( \sum_{i=1}^n \alpha_i' - \Delta_n \right) - \frac{1}{\beta} (\alpha_n' - N_n) \right]. \quad (4a)$$

Таким образом, для определения прогиба  $v_{1 \text{ доп.}}$  необходимо вычислить сумму сил  $\Delta_n$  и величину силы в последнем сечении  $N_n$ , которая определяется:

$$N_n = \Delta_n - \Delta_{n-1}.$$

Для вычисления суммы  $\Delta_n$  преобразуем систему (5), выразив правые части через коэффициенты  $\alpha_i'$ ,  $\beta$  и сумму  $\Delta_n$ .

$$N_1 = -\beta\Delta_n + \alpha_1'$$

$$N_2 = -(\beta^2 + 2\beta)\Delta_n + \beta\alpha_1' + \alpha_2'$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\dots \dots \dots \quad (8)$$

Складывая систему (8), получим уравнение для определения суммы  $\Delta_n$ .

$$\Delta_n = \frac{S_{an}}{1 + S_{\Delta n}}. \quad (9)$$

В выражении (9) через  $S_{\Delta n}$  обозначены суммы коэффициентов при  $\Delta_n$ , а через  $S_{an}$  — суммы остальных коэффициентов. Выражения этих сумм приведены в таблице 1.

Суммарный прогиб стыка с учетом податливости скрепляющих элементов на основании выражений (3), (4,а), (9) запишется:

$$v_L = \frac{2\mu pbh_0}{eE\lambda^3 b} n^3 (r-1) - \frac{3\mu pbh_0}{2eE\lambda^3 b} [(1-e)r-1] E_N, \quad (10)$$

где

$$E_N = \frac{n}{3} (4n^2 - 1) - \left( \frac{S_{2n}}{1 + S_{\Delta n}} + \frac{S_{an-1}}{1 + S_{\Delta n-1}} \right). \quad (11)$$

Относительная жесткость согласно [2, 3] выразится:

$$e_N = \frac{4n^3 e}{4n^3 - 3(1-e)E_N}. \quad (12)$$

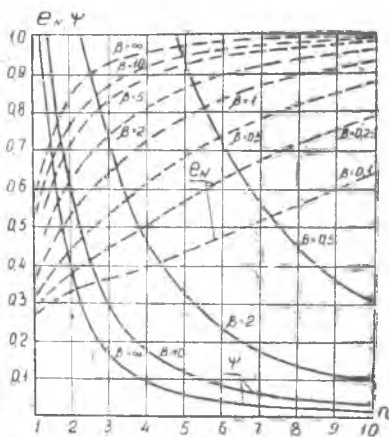
На фиг. 3 приведено изменение относительной жесткости стыка  $e_N$  в зависимости от числа зон скольжений  $n$  при различных относительных жесткостях скрепляющих элементов  $\beta$ .

Относительная жесткость стыка возрастает, стремясь к единице при увеличении числа зон скольжений и тем интенсивнее, чем выше относительная жесткость скрепления, а демпфирующая способность стыков (в форме коэффициентов рассеяния  $\psi$ ) при этом падает. На фиг. 3 приведены максимальные значения коэффициентов рассеяния (из статьи [3] выражение (19) при  $\kappa = 2$ ) по выражению

$$\psi_{\max} = 2 \frac{1 - e_N}{e_N}. \quad (13)$$

Проведем сравнение полученных зависимостей со случаем схемы равномерно распределенных упругих взаимодействий скрепляющих элементов [1] по контактирующей поверхности стыка.

Из выражения (16. 9) в работе [1] получим величину относительной жесткости  $e_*$  стыка той же схемы, что рассмотрена в данном случае. При этом связь между относительной жесткостью скрепления  $\beta$  и аналогичным параметром из [1], выражение (16, 7), который обозначим  $\beta_*$ , запишется:



Фиг. 3.

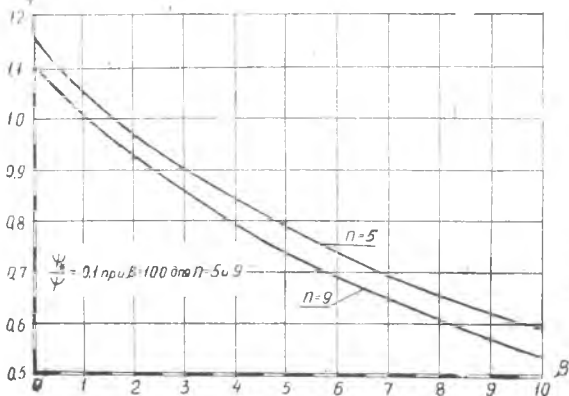
$$\beta = \frac{3c_c}{E l b e (1 - e)} = \frac{\beta_*^2 L^2}{n^2}, \quad (14)$$

а относительная жесткость из работы [1] в наших обозначениях запишется:

$$e_* = \left[ 1 + \frac{9}{n^2 \beta} \left( 1 - \frac{\text{th}(n \sqrt{\beta})}{n \sqrt{\beta}} \right) \right]^{-1} \quad (15)$$

Числовой анализ выражений (12) и (15) в форме максимальных коэффициентов рассеяния по выражению (13) показывает, что основное расхождение между данным решением и схемой равномерно-распределенных упругих связей [1] обусловлено величиной относительной жесткости скрепления  $\beta$ . При увеличении этого параметра коэффициент рассеяния (обозначим его через  $\psi_*$ ) определяемый схемой [1] и выражением относительной жесткости (15), уменьшается в сравнении с коэффициентом рассеяния, определяемым относительной жесткостью по выражению (12). Отношение коэффициентов рассеяния  $\frac{\psi_*}{\psi}$  в зависимости от величины относительной жесткости скрепления  $\beta$  представлено на фиг. 4, откуда видно, что решение по схеме равномерно-распределенных упругих связей [1] дает быстрое уменьшение демпфирующей способности стыков при возрастании относительной жесткости скрепляющих элементов.

В предельном случае при  $\beta = \infty$  схема [1] будет давать  $e_* = 1$  и  $\psi_* = 0$ , в то время, как рассмотренная в данном случае схема зон скольжений — дискретных упругих связей — будет давать правильную оценку относительной жесткости ( $e_N < 1$ ) и коэффициента рассеяния ( $\psi > 0$ , фиг. 3). Этот факт объясняется тем, что в схеме [1] при возрастании  $\beta$  проис-



Фиг. 4.

ходит постепенное уменьшение скольжений вплоть до полного прекращения (при  $\beta = \infty$ ) по всей плоскости стыка. В данном же случае — схемы зон скольжений между дискретными упругими связями скрепляющих элементов — скольжения между местами скреплений (в зоне скольжений) будут иметь место и распределяться по параболическому закону (выражение (26) из [2], а также фиг. 8) при любых значениях  $\beta$ , включая и  $\beta = \infty$ . При увеличении числа зон скольжений результаты, даваемые схемой

[1], также могут незначительно ухудшать свои значения (фиг. 4). Это объясняется соотношением между числом возмущений (число скрепляющих элементов), не учитываемых схемой [1], и относительной жесткостью скрепления  $\beta$ . Поэтому применимость схемы [1] определяется не столько числом скрепляющих элементов (зон скольжений  $n$ ), сколько величиной относительной жесткости скрепления  $\beta$ . Удовлетворительные результаты схема [1] дает при значениях:  $0 < \beta \leq (1 \div 2)$ .

### 1. Выражение сумм $S_{\Delta n}$ и $S_{\alpha n}$ в общем виде

$$\begin{aligned}
 S_{\Delta n} &= \beta \sum_{j=1}^n j + \beta^2 \sum_{\kappa=1}^{n-1} k \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \\
 &+ \beta^3 \sum_{m=2}^{n-1} (m-1) \sum_{\kappa=m}^{n-1} (k-m+ \\
 &+ 1) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \beta^4 \sum_{l=3}^{n-1} (l-2) \sum_{m=l}^{n-1} (m- \\
 &- l+1) \sum_{\kappa=m}^{n-1} (k-m+1) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \\
 &+ \dots + \beta_n.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\alpha n} &= \sum_{i=1}^n \alpha_i + \alpha_1 [\beta \sum_{j=1}^{n-1} j + \beta^2 \sum_{\kappa=2}^{n-1} (k- \\
 &- 1) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \beta^3 \sum_{m=3}^{n-1} (m-2) \sum_{\kappa=m}^{n-1} (k- \\
 &- m+1) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \dots + \beta^{n-1} \sum j] + \\
 &+ \alpha_2 [\beta \sum_{j=1}^{n-2} j + \beta^2 \sum_{\kappa=3}^{n-1} (k-2) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \\
 &+ \beta^3 \sum_{m=4}^{n-1} (m-3) \sum_{\kappa=m}^{n-1} (k-m+ \\
 &+ 1) \sum_{j=1}^{n-\kappa} j + \dots + \beta^{n-2} \sum j] + \\
 &+ \dots + \alpha_{n-1} \beta.
 \end{aligned}$$

### 2. Суммы $S_{\Delta n}$ и $S_{\alpha n}$ с числовыми коэффициентами

$S_{\Delta 1} = ;$	$S_{\alpha 1} = 1;$
$S_{\Delta 2} = \beta^2 + 3\beta;$	$S_{\alpha 2} = 3\beta + 7;$
$S_{\Delta 3} = \beta^3 + 5\beta^2 + 6\beta$	$S_{\alpha 3} = 5\beta^2 + 23\beta + 22;$
$S_{\Delta 4} = \beta^4 + 7\beta^3 + 15\beta^2 + 10\beta;$	$S_{\alpha 4} = 7\beta^3 + 47\beta^2 + 93\beta + 50;$
$S_{\Delta 5} = \beta^5 + 9\beta^4 + 29\beta^3 + 35\beta^2 + 15\beta$	$S_{\alpha 5} = 9\beta^4 + 79\beta^3 + 236\beta^2 + 273\beta + 95;$
$S_{\Delta 6} = \beta^6 + 11\beta^5 + 45\beta^4 + 84\beta^3 +$ $+ 60\beta^2 + 21\beta;$	$S_{\alpha 6} = 11\beta^5 + 119\beta^4 + 425\beta^3 +$ $+ 852\beta^2 + 658\beta + 161;$
$S_{\Delta 7} = \beta^7 + 13\beta^6 + 66\beta^5 + 165\beta^4 +$ $+ 210\beta^3 + 126\beta^2 + 28\beta;$	$S_{\alpha 7} = 13\beta^6 + 167\beta^5 + 834\beta^4 +$ $+ 2045\beta^3 + 2490\beta^2 +$ $+ 1386\beta + 252;$
$S_{\Delta 8} = \beta^8 + 15\beta^7 + 91\beta^6 + 286\beta^5 +$ $+ 495\beta^4 + 462\beta^3 + 210\beta^2 +$ $+ 36\beta;$	$S_{\alpha 8} = 15\beta^7 + 223\beta^6 + 1337\beta^5 +$ $+ 4134\beta^4 + 6985\beta^3 +$

$$\begin{aligned}
 S_{\Delta 9} &= \beta^9 + 17\beta^8 + 120\beta^7 + 455\beta^6 + & + 6270 + \beta^2 + 2646\beta^3 372; \\
 &+ 1001\beta^5 + 1287\beta^4 + & S_{\gamma 9} = 173\beta^8 + 287\beta^7 + 2040\beta^6 + \\
 &+ 924\beta^3 + 330\beta + 45\beta. & + 7525\beta^5 + 16289\beta^4 + \\
 & & 20449\beta^3 + 14124\beta^2 + \\
 & & + 4686\beta + 52a.
 \end{aligned}$$

### ПОДОБИЕ СТЫКОВ

Будем называть два стыка, различающиеся своими параметрами, подобными, если их демпфирующие способности в форме коэффициентов рассеяния одинаковы. Из этого следует, что у подобных стыков должны быть равны прежде всего максимальные значения коэффициентов рассеяния. Тогда из выражения (13) можно заключить, что основным критерием подобия является относительная жесткость стыка  $e(e_N)$ . При изменении амплитуд сил или прогибов коэффициенты рассеяния у подобных стыков изменяются по одной зависимости (выражение (19) из статьи [3]) и при одном и том же значении величины  $e_N$ .

Такое определение условий подобия стыков дает возможность легко решить вопрос — могут ли стыки с различными параметрами в принципе иметь одинаковые максимальные коэффициенты рассеяния и одинаковые коэффициенты рассеяния при различных внешних нагрузках. Таким образом, у подобных стыков должны быть равны все параметры, от которых зависит относительная жесткость.

Для стыков с одной зоной скольжения такими параметрами являются: 1. соотношение толщин стержней  $\Delta = h_2/h_1$ , [2]; 2. условия крепления и загрузки концов стыка — параметр  $d^*$ .

Параметрами, изменение которых не влечет за собой нарушения условий подобия, являются: 1. жесткость до скольжения  $C_0(E, \lambda, b)$ ; 2. обобщенная сила трения  $R(\mu, \rho b, h_0)$ .

Для примера допустим, что имеются два стыка с одинаковым соотношением толщин  $\Delta$  и одинаковыми схемами крепления и нагружения концов. Положим, что различаются только их начальные жесткости  $C_0$ , например в  $z$  раз. Пусть оба стыка деформируются силами одинаковой амплитуды. В этом случае при одинаковых относительных амплитудах прогибов  $k$  (и сил  $r$ ) и одинаковых обобщенных сил трения  $R$  они будут иметь равные коэффициенты рассеяния  $\psi$ . Если стыки при этих же условиях деформируются до одинаковых амплитуд прогибов, то они будут иметь одинаковые коэффициенты рассеяния при обобщенных силах трения, пропорциональных их жесткостям, и т. д.

\* См. статью В. П. Филекина «Зависимость относительной жесткости и коэффициента рассеяния от схемы закрепления и нагружения концов стыка». Настоящий сборник, стр. 267.

В общем случае при заданных параметрах стыков ( $C_0, e_N, R_N$ ) можно быстро определить амплитуды сил и прогибов, соответствующих одинаковым значениям коэффициентов рассеяния из условия равенства относительных ( $r = P/R; \kappa = v/v_c$ ) амплитуд сил (прогибов).

Все сказанное выше относится и к стыкам с  $n$  зонами скольжений. Но в этом случае относительная жесткость  $e_N$  зависит еще от двух параметров (фиг. 3): 1. Числа зон скольжений  $n$ ; 2. Относительной жесткости скрепляющих элементов  $\beta$  (относительная сдвиговая жесткость).

Выражение относительной сдвиговой жесткости для одного и того же стыка постоянной длины  $L$  можно записать в форме зависимости от числа зон скольжений  $n$ . Если обозначить относительную жесткость скрепляющих элементов через  $\beta_1$  для стыка при  $n=1$ , то для  $n$  зон скольжений будем иметь из выражения (6) для этого же стыка:

$$\beta_N = \frac{3C_c}{E/b e (1-e)} = \frac{3C_c}{E l_L b e (1-e) n} = \frac{\beta_1}{n}. \quad (16)$$

Вообще относительная жесткость скрепляющих элементов  $\beta$  не зависит от числа зон скольжений, являясь самостоятельным параметром стыка. Два совершенно одинаковых стыка, различающиеся только числом скрепляющих элементов — числом зон скольжений, будут иметь равные шаги между скрепляющими элементами, т. е. одинаковые  $\beta$ . Это объясняется тем, что диаметры болтов, заклепок, точек сварки и шаг между ними  $l_i$  назначаются в зависимости от толщины стыка или шва  $h_0$ . Относительная сдвиговая жесткость  $\beta$ , определяющая совместно с числом зон скольжений  $n$  относительную жесткость стыка  $e_N$ , является критерием подобия стыков.

Относительная сдвиговая жесткость характеризуется геометрическими параметрами стыка ( $i = \frac{h_0}{l_i}; e = \frac{1 + \Delta^3}{(1 + \Delta)^3}$ ) и физическими ( $\frac{C_c}{b}; E$ ).

Таким образом, основным критерием подобия стыков является относительная жесткость  $e_N$ , равенство которой для стыков с различными параметрами дает равенство максимально-возможных демпфирующих свойств ( $\Psi_{\max}$ ), и одинаковые величины коэффициентов рассеяния при соответствующих значениях амплитуд сил (прогибов).

В общем случае относительная жесткость зависит от следующих параметров, являющихся вспомогательными критериями подобия стыков:

1. Соотношения толщин стержней  $\Delta$ ;
2. Условий закрепления и нагружения концов стыка — параметр  $d$ ;
3. Числа зон скольжений  $n$ ;
4. Относительной жесткости скрепляющих элементов  $\beta$ .



Равенство всех этих параметров дает равенство и относительных жесткостей  $e_N(\Delta, d, n, \beta)$  для различных стыков, которые в этом случае являются подобными в указанном выше смысле.

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального исследования зависимости относительной жесткости, а, следовательно, и демпфирующих свойств стыков, от числа зон скольжений  $n$  и относительной сдвиговой жесткости  $\beta$  была выработана методика экспериментального исследования. При этом считалось, что относительная сдвиговая жесткость и число зон скольжений являются независимыми, самостоятельными параметрами стыка, изменение которых приводит к различным вариантам стыков. В соответствии с этим для уменьшения числа экспериментов и охвата большего числа вариантов стыков (большого числа значений  $\beta$  и  $n$ ) производилось одновременное изменение числа зон скольжений и относительной сдвиговой жесткости. Статические циклы последовательно снимались для стыка, имеющего один скрепляющий элемент, затем два и т. д. до  $n$  скрепляющих элементов. Причем эксперименты велись с одним стыком, а увеличение числа скрепляющих элементов достигалось последовательного увеличения числа скрепляющих элементов, начиная с  $n=1$ , позволяет определить сдвиговую жесткость скрепляющего элемента  $C_c$  и относительную сдвиговую жесткость  $\beta$  для любого числа зон скольжений данного стыка. В самом деле, допустим, что в консольном составном стержне (фиг. 2) имеется только один скрепляющий элемент на конце  $x=L$  (сечение  $n$ ). Тогда из выражения (12) получим относительную сдвиговую жесткость (при  $n=1$  и  $\Delta=1$ ).

$$\beta_1 = \frac{4 - 16e_1}{7e_1 - 4}. \quad (17)$$

Из выражения (16) получим значения относительной сдвиговой жесткости при делении данного стыка ( $L=\text{const}$ ) на  $n$  зон скольжений.

По выражению (16) можно также определить сдвиговую жесткость скрепляющего элемента

$$C_c = \frac{E\lambda_L b}{16} \beta_1. \quad (18)$$

Для исключения влияния изменения относительной жесткости самого стыка без скрепляющих элементов (обозначим  $e_{\text{ст}}$ , т. к. эту величину будем определять экспериментальным путем) при определении относительной сдвиговой жесткости  $\beta_1$  выразим последнюю из уравнения (12) с учетом относительной жесткости самого стыка (в выражении (12) обозначено  $e$ ).

$$\beta_1 = \frac{4(e_{\text{ЭК}} - e_{1\text{ЭК}})}{e_{1\text{ЭК}} [4 - 3(1 - e_{\text{ЭК}})] - 4e_{\text{ЭК}}} \quad (19)$$

В выражении (19) относительные жесткости без скрепляющих элементов  $e_{\text{ЭК}}$  и того же стыка с одним скрепляющим элементом  $e_{1\text{ЭК}}$  определяются последовательно по статическим циклам.

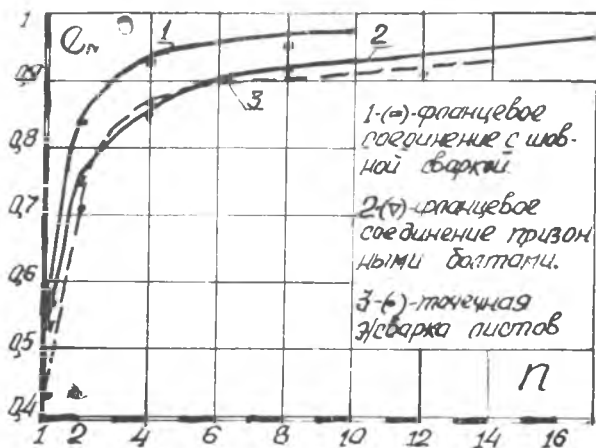
Для стержня с упруго-подвижной заделкой (в [2], фиг. 2, б) можно также пользоваться выражениями (16)–(19), но при этом число зон скольжений должно уменьшаться вдвое.

$$n_{\text{конс}} = \frac{1}{2} n_{\text{упр. задел.}} \quad (20)$$

Таким образом, при данной методике определения сдвиговой жесткости скрепляющих элементов нет необходимости в изготовлении специальных образцов для испытания их на растяжение, как это выполнено в работах [1, 4] для заклепочных швов.

Экспериментальные образцы представляли собой изолированные стыки (фиг. 1, в [3]), имевшие в качестве скрепляющих элементов призонные болты-штифты, шовную сварку, заклепки, точечную сварку. Стыки деформировались как по схеме составного консольного стержня (фиг. 2 а, в [2]), так и по схеме составного стержня с упруго-подвижной заделкой (фиг. 2, б, в [2]). Эксперименты заключались в снятии статических циклов по вышеописанной методике — с последовательной постановкой скрепляющих элементов. По статическим циклам определялись: жесткость до скольжения  $C_{0\text{ЭК}}$  и жесткость в фазе скольжения  $C_{12\text{ЭК}}$  и экспериментальное значение относительной жесткости ( $e_{N\text{ЭК}} = \frac{C_{12\text{ЭК}}}{C_{0\text{ЭК}}}$ ).

На фиг. 5 представлены зависимости относительной жесткости стыков от числа зон скольжений. Экспериментальные значения



Фиг. 5.

удовлетворительно совпадают с расчетными по зависимости (12), которая в данном случае протекает при  $\beta = \text{var}$ , а поэтому отличается от аналогичной по фиг. 3 при  $\beta = \text{const}$ .

Полученные значения относительной сдвиговой жесткости скрепляющих элементов меняются в широких пределах:  $1 \leq \beta \leq 100$ .

## ВЫВОДЫ

1. Теоретическая зависимость относительной жесткости стыка  $e_N$ , по выражению (12), от числа зон скольжений  $n$  и относительной сдвиговой жесткости скрепляющих элементов  $\beta$  хорошо подтверждается результатами эксперимента для различных типов стыков.

2. Разработанная методика исследования позволяет достаточно просто определять по экспериментальным статическим циклам сдвиговую жесткость  $C_c$  и относительную сдвиговую жесткость  $\beta$  скрепляющих элементов непосредственно на стыках.

3. Основным критерием подобия стыков из условия равенства их демпфирующих свойств ( $\psi$ ) является относительная жесткость стыка  $e_N$ , которая определяется следующими параметрами:

- а) соотношением толщин  $\Delta$ ;
- б) условиями крепления и нагружения концов стыка  $d$ ;
- в) числом зон скольжений  $n$ ;
- г) относительной сдвиговой жесткостью скрепляющих элементов  $\beta$ .

4. Возможность использования схемы равномерно-распределенного упругого взаимодействия скрепляющих элементов [1] определяется, в основном, не числом скрепляющих элементов, а величиной их относительной сдвиговой жесткости  $\beta$ . Эта схема дает удовлетворительные результаты в интервале:  $0 < \beta \leq (1 \div 2)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Калинин, Ю. А. Лебедев, В. И. Лебедева Я. Г. Пановко, И. Г. Страхов. Конструктивное демпфирование в неподвижных соединениях, АН Лат. ССР, Рига, 1960.

2. В. П. Филёкин. Конструктивный гистерезис в составной балке при отсутствии скольжений на концах ИВУЗ, «Авиационная техника», № 1, 1960.

3. В. П. Филёкин. Конструктивный гистерезис во фланцевых и шовных соединениях. ИВУЗ, «Авиационная техника», № 4, 1960.

4. Г. А. Шапиро. Работа заклепочных соединений стальных конструкций М., 1949.