

М. Г. СТАКЯН, А. М. АВАНЕСОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА НАЛОЖЕНИЯ НАДРЕЗОВ
 В ГАЛТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ ВАЛОВ

В статье рассматривается взаимодействие галтели с острым контурным надрезом, когда общее поле напряжения возле комбинированного надреза усиливается (эффект наложения надрезов) (рис. 1), имитируя при этом наличие дефектов механической обработки на поверхностях галтельных переходов валов. Исследование напряженного состояния возле наложенных надрезов, преимущественно, выполнялось

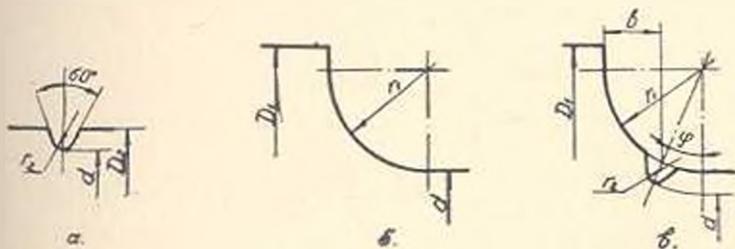


Рис. 1. Виды надрезов: а — контурный надрез, б — галтель, в — галтель-контурный надрез.

экспериментально и было связано со сравнительно сложными контурными условиями, затрудняющими отыскание соответствующей функции напряжения. В [1] приводится решение этой задачи методами теории упругости для надрезов, контуры которых очерчены, в частности, эллипсом и гиперболой. В [2] дана оценка изменения эффекта наложения и, исходя из принципов неполного суммирования максимальных напряжений составляющих надрезов, предложены зависимости для определения коэффициентов концентрации напряжений (ККН) и эффективных коэффициентов концентрации напряжений (ЭККН) комбинированных надрезов:

$$\alpha_{31,2} = \beta_1 \alpha_{31} + \alpha_{32}, \tag{1}$$

$$K_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{K_2} - \left(\frac{1}{K_1} - 1\right) \cdot \beta_2} \tag{2}$$

где $\alpha_{31,2}$; $K_{1,2}$ — ККН и ЭККН комбинированных надрезов;
 $\alpha_{31}(K_1)$; $\alpha_{32}(K_2)$ — ККН (ЭККН) основного и контурного надрезов;
 β_1, β_2 — коэффициенты эффективности наложения при статическом и циклическом нагружениях.

На рис. 2 значения контурных напряжений даны в числах полюс m , т. е. $\sigma_{\text{конт}} = m \cdot \sigma_0^{(1,0)}$, где $\sigma_0^{(1,0)} = 12,4 \cdot 10^3 \frac{H}{м} \cdot \frac{1}{м}$ — оптическая постоянная материала ЭД-6М, из которого изготовлялись плоские модели валов, нагруженные при чистом изгибе [3]. Зона высокой напряженности галтели (рис. 2а) занимает сравнительно узкий сектор на

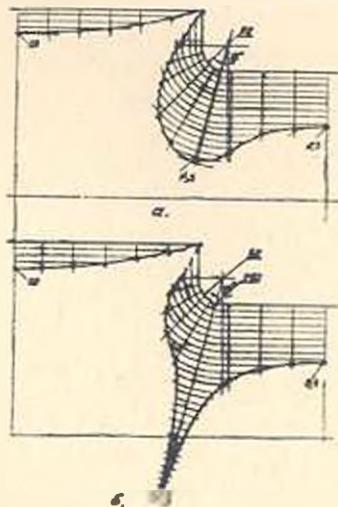


Рис. 2. Распределение контурных напряжений: а — для галтели; б — для комбинированного надреза.

ее основании; $\sigma_{\text{мин}}$ расположено в непосредственной близости от сопряжения галтели с цилиндрической частью вала, где чаще всего наблюдаются дефекты. Контурный надрез (рис. 2б) оказывает превалирующее влияние на эффект наложения и резко изменяет напряженность сечения, где действует $\sigma_{\text{макс}}$, в связи с чем эффект наложения зависит от взаимного расположения рассмотренных надрезов. Решение задачи имеет практический интерес, так как представляется возможным определить границу расположения надрезов, при котором их взаимное влияние исключается. Проводились циклические испытания цилиндрических образцов $d = 20$ мм из стали 45 в нормализованном состоянии ($\sigma_B = 673$ Мн/м², $\sigma_T = 419$ Мн/м²). В отличие от [4], при постоянных геометрических параметрах, контурный надрез от положения, обуславливающего максимальный эффект наложения, постепенно перемещался в сторону к гладкой части вала, что более соответствует реальным случаям наложения дефектов. Режим нагружения — совместное действие циклического изгиба и статического извлечения с постоянным отношением $\frac{\sigma}{\sigma_B} = 0,45$, характерный для стационарных режимов работы валов передаточных механизмов. Всего было проведено 6 серий опытов, по 15 образцов в каждой серии. База испытаний составляла $5 \cdot 10^6$ циклов нагружений. Результаты опытов обработаны согласно [5] и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Серия опытов	Характеристики надрезов							Параметры и результаты циклических испытаний								
	вид надрезов	$\frac{D_1}{d}$	$\frac{D_2}{d}$	$\frac{r_1}{d} \cdot 10^3$	$\frac{r_2}{d} \cdot 10^3$	b мм	r^*	$S_a \cdot 10^3$	$S_N \cdot 10^3$	$\lg \bar{\sigma}$	$\lg \bar{N}$	r	\bar{m}_{30}	$S_m \cdot 10^3$	$S_{Nr} \cdot 10^3$	σ_{-1} Мн/м ²
1	Гладкие образцы							53	550	2,462	5,3786	-0,991	10,38	374	74	230
2	Рис. 1а	—	1,025	—	10	—	—	77	499	2,313	5,3727	-0,990	6,44	241	69	152
3	Рис. 1б	1,475	—	100	—	—	—	53	416	2,354	5,5579	-0,958	7,55	603	119	181
4	Рис. 1в	1,475	1,025	100	10	1,45	16	82	411	2,257	5,7601	-0,974	4,89	301	92	132
5						2,00	0	70	364	2,285	5,6581	-0,986	5,12	190	50	142
6						2,50	—	70	385	2,285	5,6337	-0,976	5,35	323	85	142

Полное изучение эффекта наложения предварительно связано с рассмотрением всех факторов, влияющих на ЭККН надразов. Ранее указывалось на зависимость этих величин от геометрических параметров и числа циклов [6]. Но в связи с естественным разбросом $\lg N$ значения ЭККН носят случайный характер, т. к. они представляют отношение пределов выносливости гладких и надрезанных образцов, подсчитанных с определенной вероятностью неразрушения $l(N)$. Предлагаемый способ вероятностной оценки расчетных значений ЭККН основан на использовании семейства кривых выносливости [5]; при этом статистические параметры с индексом K относятся к надрезанным образцам:

$$\lg N = -(\bar{m}_{50} + K_B \cdot S_m)(\lg \bar{\sigma} - \lg \bar{\sigma}) + (\lg \bar{N} + K_B \cdot S_{N_r}); \quad (3)$$

$$\lg N = -(\bar{m}_{50K} + K_B \cdot S_{mK})(\lg \bar{\sigma} - \lg \bar{\sigma}_K) + (\lg \bar{N}_K + K_B \cdot S_{N_rK}). \quad (4)$$

где $\lg \bar{\sigma}$, $\lg \bar{N}$ — средне-вероятностные значения логарифмов напряжения и долговечности (координаты центра ряда распределения);

$\lg \bar{\sigma}$, $\lg \bar{N}$ — текущие значения логарифмов σ , N ;

$\bar{m}_{50} = r \cdot \frac{S_N}{S_\sigma}$ — коэффициент регрессии;

r — коэффициент корреляции ряда распределения;

S_σ , S_N — среднеквадратичные отклонения $\lg \sigma$, $\lg N$;

K_B — коэффициент вероятности неразрушения;

$S_m = \frac{S_N}{S_\sigma} \sqrt{\frac{1-r^2}{n}}$ — основное отклонение коэффициента регрессии;

n — число испытанных образцов;

$S_{N_r} = S_N \sqrt{1-r^2}$ — мера индивидуального рассеивания $\lg N$.

Значения расчетных пределов выносливости при фиксированных N и $l(N)$, согласно (3), (4), равны:

$$\lg \bar{\sigma}_{\text{пер}} = \frac{(\lg \bar{N} + K_B \cdot S_{N_r}) - \lg N}{\bar{m}_{50} + K_B \cdot S_m} + \lg \bar{\sigma}; \quad \lg \bar{\sigma}_{K \text{ пер}} =$$

$$= \frac{(\lg \bar{N}_K + K_B \cdot S_{N_rK}) - \lg N}{\bar{m}_{50K} + K_B \cdot S_{mK}} + \lg \bar{\sigma}_K.$$

$$\lg K = \lg \bar{\sigma}_{\text{пер}} - \lg \bar{\sigma}_{K \text{ пер}} = \lg \frac{\bar{\sigma}_{\text{пер}}}{\bar{\sigma}_{K \text{ пер}}}.$$

$$\lg K = \left\{ \left| \frac{\lg \bar{N} + K_B \cdot S_{N_r}}{\bar{m}_{50} + K_B \cdot S_m} - \frac{\lg \bar{N} + K_B \cdot S_{N_rK}}{\bar{m}_{50K} + K_B \cdot S_{mK}} \right| + (\lg \bar{\sigma} - \lg \bar{\sigma}_K) \right\} +$$

$$+ \left| \frac{1}{\bar{m}_{50K} + K_B \cdot S_{mK}} - \frac{1}{\bar{m}_{50} + K_B \cdot S_m} \right| \cdot \lg N, \quad (5)$$

$$\lg K = S_b + M_b \cdot \lg N. \quad (6)$$

Зависимость (6) справедлива при $N = 0.5 \cdot 10^6 + 2 \cdot 10^6$, где сохраняется прямая связь между $\lg \bar{\sigma}$ и $\lg N$. Можно считать, что S_b является уровнем, а M_b — интенсивностью концентрации напряжений. Сте-

пень рассеивания ЭККН связана с особенностями изменения статистических параметров выносливости, обуславливающих взаимное расположение (\bar{m}_{50} , $\lg N$, $\lg \sigma$) и размеры (S_m , S_N) областей разброса $\lg N$ гладких и надрезанных образцов, в зависимости от геометрических размеров и вида нагружения последних. С усилением степени остроты надрезов центры рядов распределения опускаются вниз и перемешаются

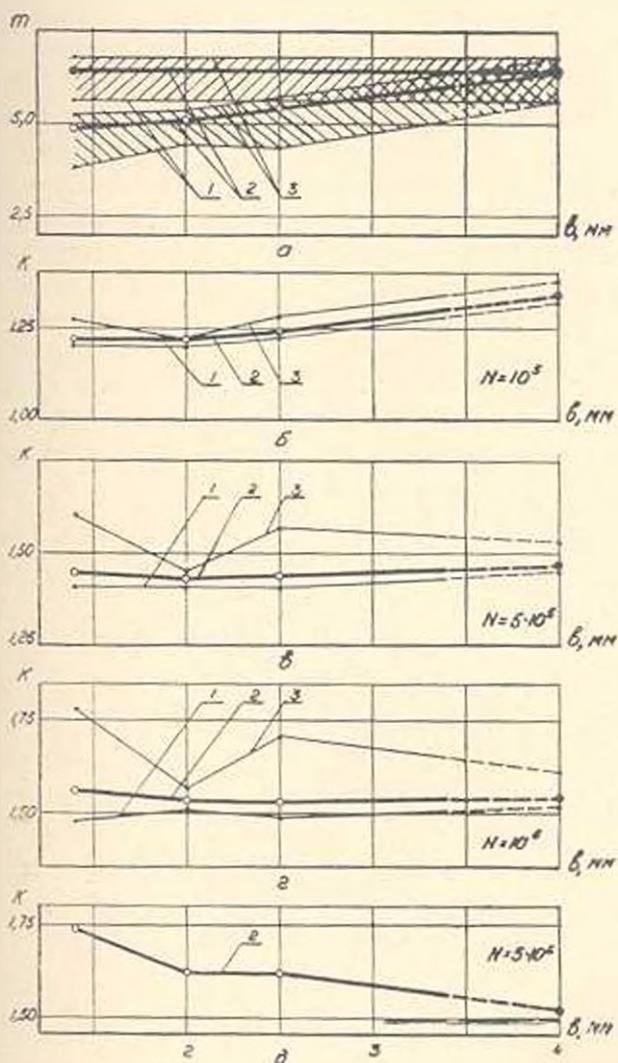


Рис. 3. Изменение показателей наклона m и ЭККН комбинированных надрезов в зависимости от места наложения контурного надреза. а — изменение m ; б, в, г, д — изменение ЭККН; светлыми кружочками показаны значения \bar{m}_{50} и K_{50} комбинированных надрезов, сплошными кружочками — для контурного надреза.

в зону больших N , а значения \bar{m}_{50} уменьшаются, что вызывает аналогичное смещение областей разброса $\lg N$ и увеличение их степени крутизны. Максимальные изменения \bar{m}_{50} , $\lg N$ и $\lg \sigma$ характерны для четвертой серии опытов — случай полного наложения надрезов. При этом З. ТН, № 6.

происходит сужение областей разброса $\lg N$, связанное с уменьшением S_{m_1} и S_{m_2} . Сравнительно низкие значения S_{m_1} , S_{m_2} для гладких образцов вызваны упрочняющим действием статических касательных напряжений при данном режиме нагружения [7].

Значения S_{m_1} , S_{m_2} для комбинированных и контурных надрезов сравнительно близки, поэтому при оценке влияния места наложения последних основное значение приобретает изменение m_{max} , $\lg N$, $\lg \sigma$. На расстоянии $b > 2r_1$ эти значения выравниваются; на рис. 3а показано совпадение областей разброса m при $b = 2r_1$. Здесь и далее кривые 1, 2, 3 относятся соответственно к $I(N) = 10\%$, 50% и $99,9\%$. В рассматриваемом случае контурный надрез вызывает более высокую концентрацию напряжения, поэтому составили вероятностные значения $K_{1,2}$ и K_3 . При $N = 10^6$ (рис. 3б) эффект концентрации напряжений низкий и в связи с высокой плотностью распределения $\lg N$ разброс ЭККН незначительный. С переходом в область больших значений N (рис. 3в-г) ЭККН постепенно возрастают, а их поля разброса расширяются. На уровне $N = 10^8$ относительное расхождение между K_{1a} и K_{3a} — ЭККН при $I(N) = 50\%$ и $99,9\%$ — составляет $\delta_{3a} = (8-20)\%$. Можно полагать, что при $N > 10^6$ значения δ_{3a} возрастут. Это следует учесть при уточненных расчетах деталей на прочность, т. к. табличные значения K , прило-

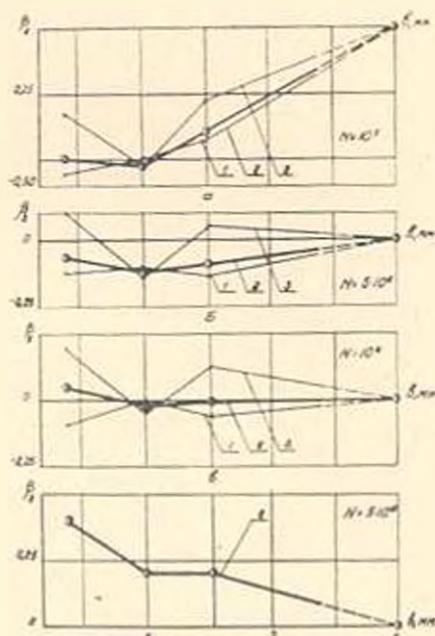


Рис. 4. Изменение коэффициента δ_3 в зависимости от места наложения контурного надреза. Кружочками показаны значения 2; 10.

женные в справочной литературе, фактически соответствуют $I(N) = 50\%$ или близкой к ней вероятности неразрушения в области длительной выносливости.

Как видно из рис. 3б—д, относительный рост значений $K_{1,2}$ и K при $N=10^5-5 \cdot 10^6$ неодинаковый, что свидетельствует о влиянии уровня перенапряжений на эффект наложения надрезов.

Рассмотрим особенности изменения коэффициента β_2 , вычисленного на основании (2) и (6). При $N=10^5$ (рис. 4) эффект наложения не только отсутствует, но и в связи с упруго-пластическим деформированием вершин надрезов, вызванным действием значительных по величине τ , имеет место упрочнение, при котором оказывается $\beta_2 < 0$. Влияние упрочнения затухает при $N \approx 10^6$. Здесь, независимо от места наложения контурных надрезов $\beta_{2,50} \approx 0$ (рис. 4в—крипая 2), т. е. наблюдается взаимное уравнивание влияний эффекта упрочнения и эффекта наложения. При низких уровнях перенапряжений семейства кривых β_2 постепенно перемещаются в область положительных значений, а на уровне длительных пределов выносливости проявление эффекта наложения является максимальным; здесь, несомненно, влияет взаимное расположение надрезов ($b \geq 2r_1$ — рис. 4г).

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Поступило 20.VI.1969.

Մ. Գ. ԱՏԱԿՅԱՆ, Վ. Մ. ԱՎԱԽԱՆՈՎ

ԼԻՍԵՆՆԵՐԻ ԳԱՆՏԵԼԱՅԻՆ ԱՆՑՈՒՄՆԵՐԻ ՎՐԱ ՍՈՐԵ ԵԳՐԱԳԾԱՅԻՆ
ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՏՈՐՆԵՐԻ ՎԵՐԱԿՐԲԱՆ ԷՅԵԿՏԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ս. մ փ ո փ ո լ մ

Դիտարկվում է կոնստրուկտիվ լարումների կոնցենտրատորի՝ լիսենի պատկերի անցման մակերևույթի վրա սուր եզրագծային կոնցենտրատորների վերադրման դեպքը, որոնք նմանակում են մեխանիկական մշակման դեֆեկտները:

Չտոտէլաստիկ շափումների և նման բարդ կոնցենտրատորներով պողպատե նմուշների ցիկլիկ փորձարկումների հիման վրա բացահայտված է կոնցենտրատորների վերադրման էֆեկտի փոփոխման բնույթը, երբ վերջիններս անփոփոխ երկրաչափական պարամետրների դեպքում փոխում են իրենց փոխադարձ դիրքը:

Տրված է լարումների կոնցենտրացիայի էֆեկտիվ դորձակիցների արժեքների և կոնցենտրատորների վերադրման էֆեկտի փոփոխությունը հաշվի առնող զորձակցի հավանական զնահատականը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Nishtharu T., Fujii T. Stresses in an Infinite Plate With an Overlapped Hole. Proc. VI Japan Nat. Congr. Appl. Mech., 1956*, Tokyo, 1957.
2. Стахан М. Г., Мак С. Л. Исследование эффекта наложения концентрации напряжений. «Изв. вузов, Машиностроение», 1, 1969.
3. Рвачев В. В., Стахан М. Г. Оптическая поляризационная установка на базе металлографического микроскопа «Заводская лаборатория», 1, 1967

4. *Howbray A. Q., Jr.* The Effect of Superposition of Stress Raisers on Members Subjected to Static or Repeated Loads., Proc. SESA*, vol. X, 1953.
5. *Шашин М. Я.* Методика статистической обработки экспериментальных данных с учетом вероятности неразрушения и различия дисперсии по напряжениям. Сб. «Труды ЛМИ», 23, 1962.
6. *Серенсен С. В., Козаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. М., Машгиз, 1963
7. *Стакин М. Г., Мак С. Л.* К вопросу о циклической прочности валов Сб. «Детали машин и подъемно-транспортные машины», вып. 7, Киев, 1968.