

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ГЛАДКОЙ ДЕТАЛИ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОПЕРЕЖАЮЩЕМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

© 2008 В. Ф. Павлов, В. А. Кирпичёв, Е. А. Денискина, О. Ю. Семёнова

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматриваются распределения остаточных напряжений упрочнённой гладкой детали и дополнительные сжимающие остаточные напряжения после нанесения надреза полукруглого профиля, а также различные законы изменения осевых остаточных напряжений гладкой детали, моделирующие практически все возможные случаи их распределения после упрочнения деталей известными методами поверхностного пластического деформирования.

Опережающее поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, концентрация напряжений, перераспределение остаточных напряжений

Известно [1], что при невозможности подвергнуть поверхностным пластическим деформированием непосредственно концентратор напряжений упрочняется гладкая деталь, а затем на неё наносится концентратор. Такое упрочнение детали называется опережающим поверхностным пластическим деформированием (ОППД). При нём наблюдается заметное повышение сопротивления усталости деталей даже в том случае, когда упрочнённый слой гладкой детали при изготовлении концентратора прорезается полностью. Это обусловлено перераспределением остаточных усилий гладкой упрочнённой детали и возникновением дополнительных сжимающих остаточных напряжений [2].

Необходимо выявить наиболее рациональное распределение остаточных напряжений упрочнённой гладкой детали с тем, что-

бы дополнительные сжимающие остаточные напряжения после нанесения надреза полукруглого профиля радиуса R (рис. 1) были наибольшими или, иначе, сопротивление усталости после ОППД было наибольшим [3]. Рассматривались различные законы изменения осевых остаточных напряжений $s_z(x)$ гладкой детали (рис. 2), моделирующие практически все возможные случаи их распределения после упрочнения деталей известными методами поверхностного пластического деформирования. Здесь $x = y/R$ – расстояние от поверхности гладкой детали до текущего слоя, выраженное в долях R ; s_0 – максимальное значение осевых остаточных напряжений. В табл. 1 представлены аналитичес-

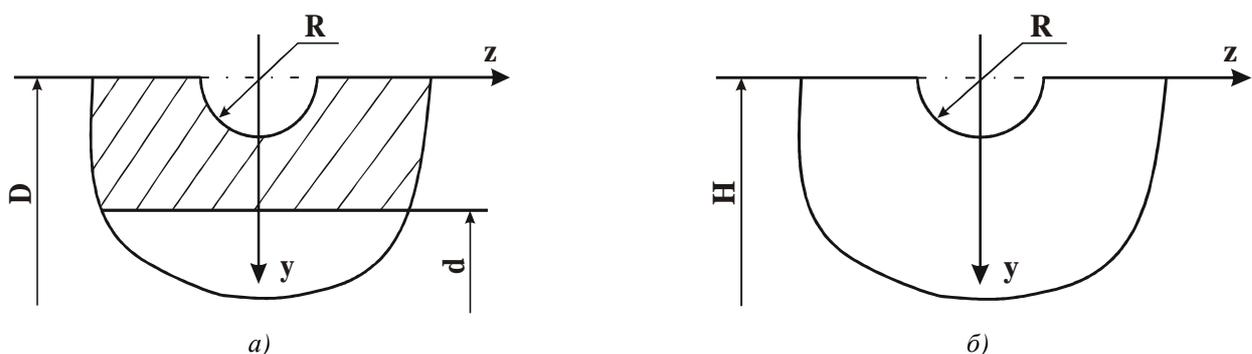


Рис. 1. Надрез полукруглого профиля на цилиндрической детали (а) и детали прямоугольного поперечного сечения (б)

Таблица 1. Варианты распределения остаточных напряжений гладкой цилиндрической детали и дополнительные остаточные напряжения на дне надреза полукруглого профиля $R = 0,3$ мм

Вариант	$\frac{S_z(x)}{S_0}$	$\frac{S_{z\delta}(1)}{S_0}$, аналитическая зависимость	$\frac{S_{z\delta}(1)}{S_0}$, численный метод			
			$D = 10$ мм	$D = 15$ мм	$D = 25$ мм	$D = 50$ мм
1	$1 - \sqrt{1 - x^2}$	0,734	0,743	0,739	0,736	0,735
2	x^2	1,023	1,042	1,034	1,029	1,026
3	x	1,296	1,319	1,315	1,302	1,296
4	$1 - (1 - x)^2$	1,590	1,621	1,612	1,596	1,587
5	$2x\sqrt{1 - x^2}$	1,324	1,388	1,376	1,368	1,356
6	$(1 - x)^2$	0,477	0,511	0,501	0,492	0,484
7	$1 - x$	0,771	0,813	0,798	0,786	0,775
8	$1 - x^2$	1,044	1,090	1,079	1,059	1,045
9	$\sqrt{1 - x^2}$	1,333	1,389	1,374	1,352	1,336
10	1	2,067	2,132	2,113	2,088	2,071

кие выражения приведённых на рис. 2 вариантов распределения остаточных напряжений, при этом нумерация вариантов табл. 1 соответствует нумерации эпюр напряжений на рис. 2.

Варианты 1–5 соответствуют обработке деталей поверхностным пластическим деформированием с интенсивными режимами упрочнения и обработке деталей из материалов с низкой температуропроводностью [4], когда наблюдается спад сжимающих остаточных напряжений к поверхности, т.е. имеет место случай подповерхностного максимума напряжений. Такие эпюры напряжений реализуются, например, при обкатке роликом с большими усилиями накатывания. Упрочнение деталей на более «мягких» режимах или упрочнение деталей, изготовленных из материалов с высокой температуропроводностью, приводит к распределению остаточных напряжений по вариантам 6–9, когда максимум напряжений находится на по-

верхности детали. Вариант 10 соответствует случаю мелкого надреза, когда напряжения можно считать постоянными по толщине поверхностного слоя детали, равной радиусу надреза R .

Дополнительные осевые остаточные напряжения на дне надреза $R = 0,3$ мм $S_{z\delta}$ (1) вычислялись по аналитической зависимости работы [5] и методом конечных элементов (МКЭ). Результаты расчётов для сплошных цилиндрических деталей различного диаметра приведены в табл. 1. Можно видеть, что с увеличением диаметра деталей, т.е. с приближением к мелкому надрезу, значения $S_{z\delta}(1)$, вычисленные с использованием МКЭ, приближаются к напряжениям, вычисленным по аналитической зависимости. При $D = 50$ мм наибольшее расхождение не превышает 2,5 % (вариант 5), что свидетельствует о достаточной точности расчётов, проведенных МКЭ.

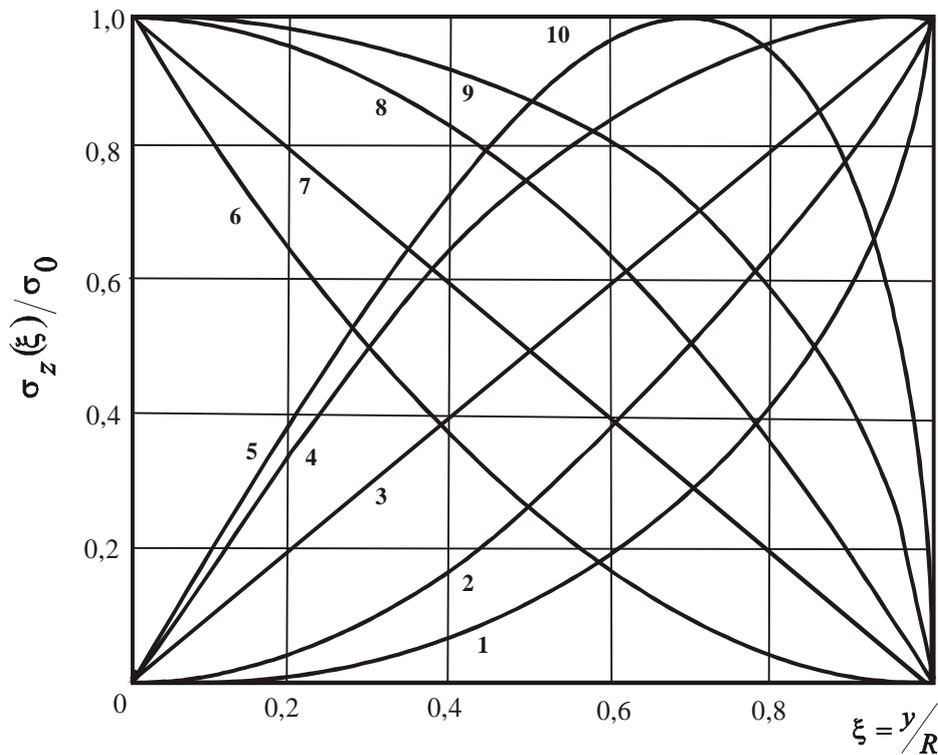


Рис. 2. Варианты распределения остаточных напряжений гладкой детали

Из сравнения дополнительных напряжений (табл. 1) на дне надреза следует, что с уменьшением диаметра при неизменной эпюре напряжений гладкой детали остаточные напряжения увеличиваются. Это объясняется уменьшением области детали, в которой происходит перераспределение остаточных усилий. Кроме того, с уменьшением диаметра увеличивается расхождение между напряжениями, вычисленными по аналитической зависимости и с использованием МКЭ, которое в варианте 6 достигает 7 %. Поэтому для повышения точности определения дополнительных остаточных напряжений в деталях малого диаметра следует применять численные методы, т. к. аналитическое решение справедливо только для достаточно мелких надрезов.

При одинаковой площади эпюр остаточных напряжений гладкой детали (рис. 2, варианты 2 и 6, 3 и 7, 4 и 8) бóльшие дополнительные напряжения (табл. 1) возникают в случаях, когда бóльшие ординаты эпюр смещены к дну надреза. В этих случаях будет наблюдаться и бóльшее приращение предела выносливости упрочнённой ОППД детали [3]. Поэтому для увеличения сопротивления

усталости при ОППД необходимо стремиться не только к тому, чтобы эпюра остаточных напряжений гладкой детали была наиболее полной, но и к тому, чтобы наибольшие остаточные напряжения действовали в наиболее приближённом к дну надреза слое детали.

На рис. 3 для вариантов 1, 3, 7 и 9 распределения остаточных напряжений гладкой детали приведены дополнительные осевые напряжения $S_{z\partial}$ по толщине поверхностного слоя в наименьшем сечении детали с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленные по аналитической зависимости и с использованием МКЭ при $D = 10$ мм. Видно, что некоторое различие наблюдается на поверхности надреза, а на расстоянии от поверхности $a > 0,3$ мм напряжения практически одинаковы. При $D > 10$ мм остаточные напряжения, вычисленные МКЭ, приближаются к напряжениям, вычисленным аналитически как на поверхности надреза, так и по толщине поверхностного слоя. Аналогичные результаты получены и для других вариантов распределения остаточных напряжений и радиусов надреза R .

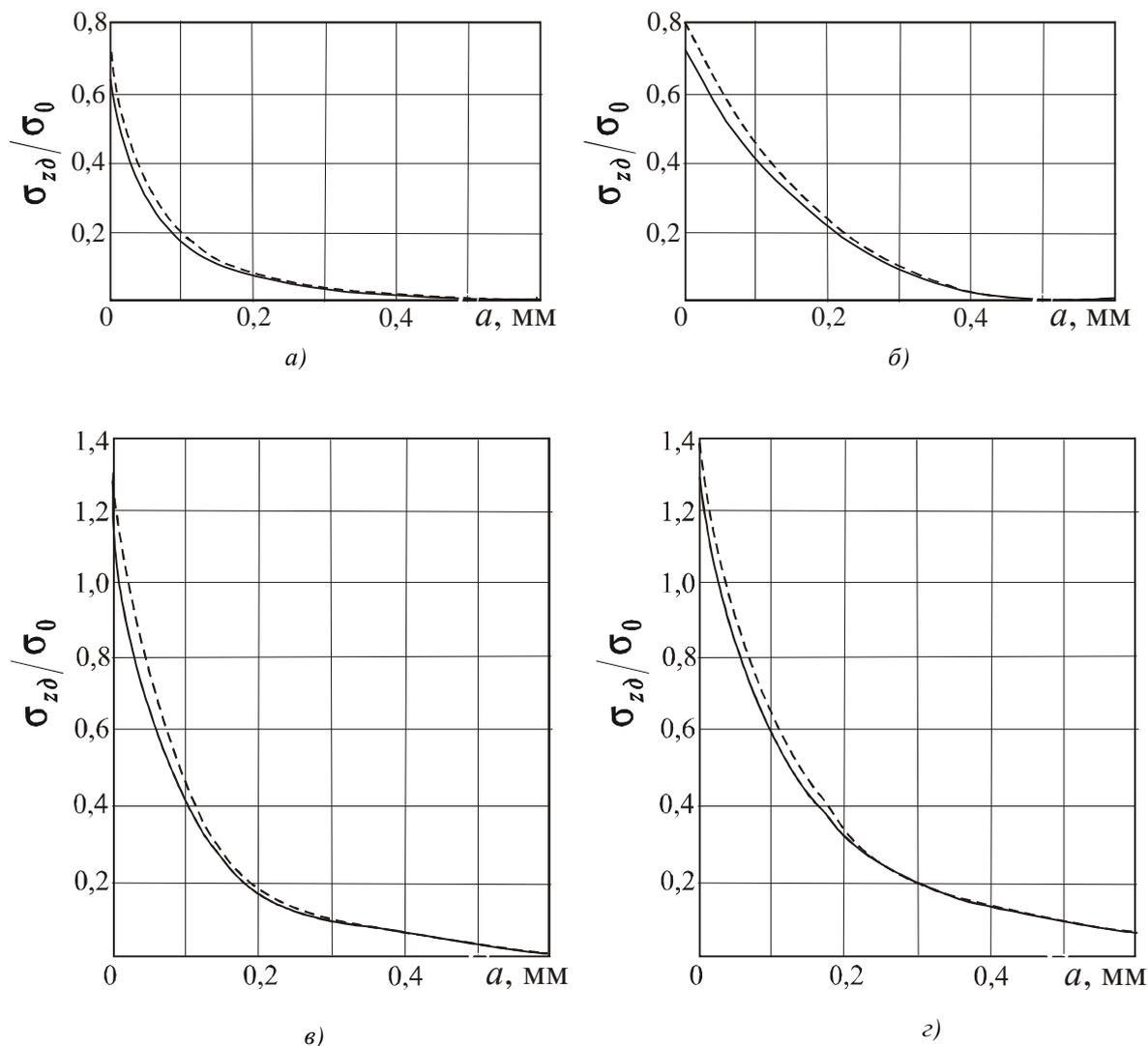


Рис. 3. Дополнительные осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали диаметром $D = 10$ мм с надрезом $R = 0,3$ мм, вычисленные аналитическим (—) и численным (- - -) методами для вариантов табл. 1: а – 1, б – 7, в – 3, г – 9

Изучались также закономерности распределения дополнительных осевых остаточных напряжений в наименьшем сечении цилиндрической детали с отверстием диаметром d (рис. 1, а). На рис. 4 в качестве примера для вариантов 1, 3, 7 и 9 представлены графики изменения $S_{z\delta}$ в наименьшем сечении сплошных и полых деталей ($D = 15$ мм, $R = 0,3$ мм) с внутренним диаметром $d = 10$ и 12 мм. Из рис. 4 следует, что с увеличением диаметра отверстия остаточные напряжения возрастают, и тем больше, чем полнее эпюра остаточных напряжений гладкой детали. Так, для варианта 1 (рис. 4, а) при увеличении диаметра отверстия до 12 мм остаточные напряжения на поверхности надреза повышаются

на 7 % по сравнению со сплошной деталью, а для варианта 7 (рис. 4, б), где площадь эпюры напряжений гладкой детали значительно больше (рис. 2) – на 31 %. Подобные результаты получены и для других размеров D, d, R деталей и надрезов.

С увеличением расстояния a от поверхности надреза абсолютное различие между дополнительными напряжениями сплошной и полых деталей уменьшается, однако относительное расхождение остаётся примерно таким же, как и на поверхности. В связи с этим расчёт дополнительных остаточных напряжений для полых цилиндрических деталей необходимо проводить численным методом. Использование в этом случае аналитического метода [5], дающего удовлетво-

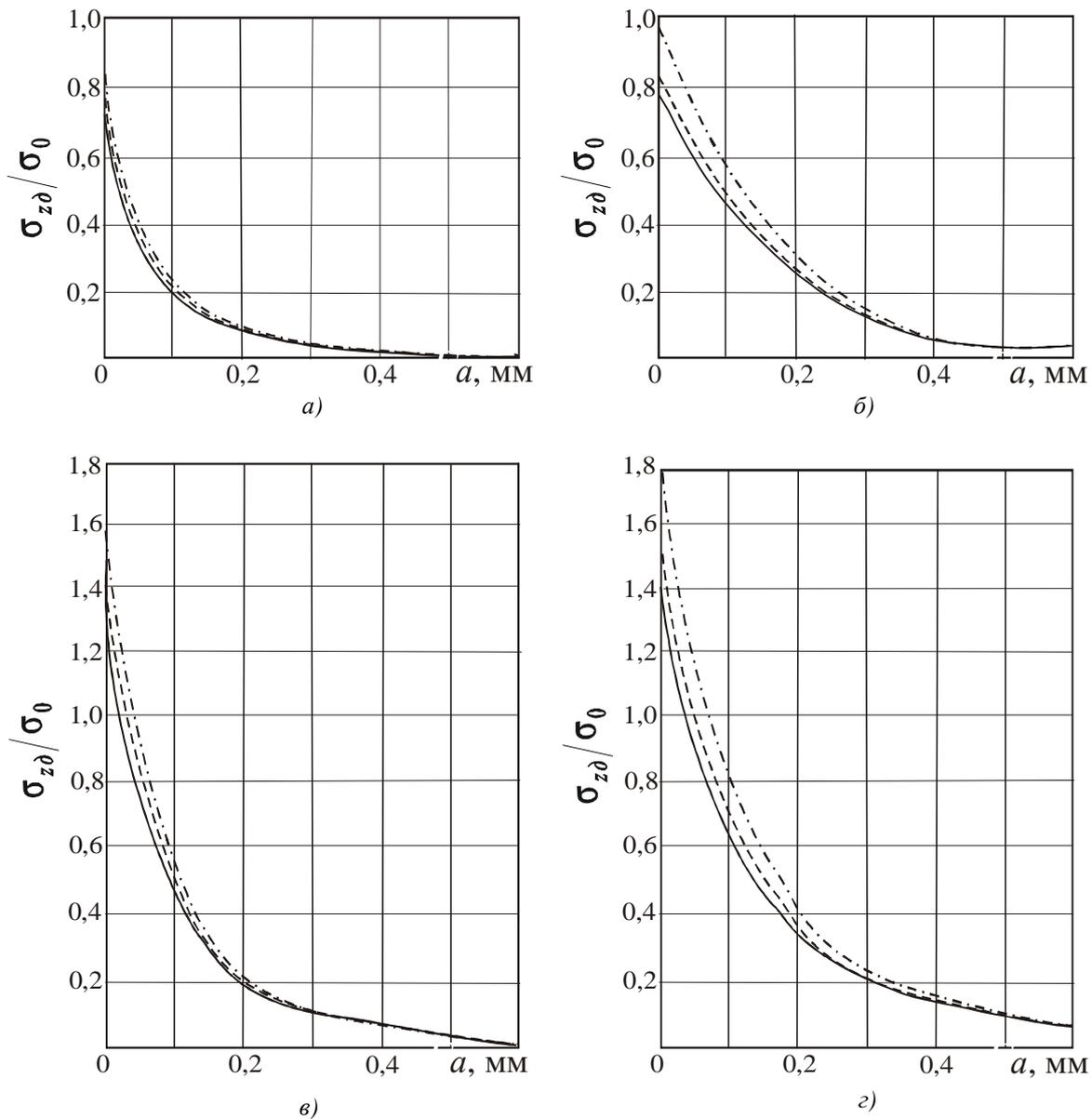


Рис. 4. Дополнительные осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении сплошных (————) и полых (---- $d=10$ мм, - x - x - $d=12$ мм) деталей диаметром $D=15$ мм с надрезом $R=0,3$ мм для вариантов табл. 1: а – 1, б – 7, в – 3, г – 9

рительные результаты для сплошных деталей, приведёт к существенной ошибке, которая будет возрастать с увеличением диаметра отверстия.

В табл. 2 для варианта 7 приведены дополнительные остаточные напряжения по толщине поверхностного слоя a в полых цилиндрических деталях различного диаметра при толщине стенки 5 мм с надрезом $R=0,3$ мм. Для сравнения здесь же представлены результаты расчёта S_{zd} для сплошной детали с $D=10$ мм. Из приведённых данных видно, что при одной и той же эпюре оста-

точных напряжений гладкой детали дополнительные напряжения в наименьшем сечении практически одинаковы для деталей одинаковой толщины, не зависят от диаметра и равны напряжениям сплошной детали с поперечным размером, равным удвоенной толщине стенки. Эта закономерность наблюдается и для всех других вариантов эпюр остаточных напряжений, других толщин стенок и радиусов надреза R . Следовательно, для исследованных значений D , d и R на дополнительные осевые остаточные напряжения S_{zd} в наименьшем сечении детали оказывает

Таблица 2. Дополнительные остаточные напряжения $S_{z\partial}$ в наименьшем сечении детали

Размеры детали		Расстояние от поверхности надреза – a , мм							
D , мм	d , мм	0	0,060	0,129	0,256	0,382	0,583	0,780	1,100
10	0	0,813	0,570	0,372	0,177	0,107	0,050	0,028	0,015
15	5	0,804	0,563	0,367	0,174	0,105	0,048	0,026	0,014
25	15	0,805	0,564	0,367	0,175	0,106	0,050	0,027	0,015
50	40	0,812	0,568	0,371	0,178	0,105	0,050	0,027	0,014

влияние только толщина стенки. При исследовании дополнительных напряжений в полых деталях можно использовать результаты расчёта напряжений для сплошных деталей, диаметр которых равен удвоенной толщине стенки.

Были проведены расчёты дополнительных осевых остаточных напряжений для плоских деталей с надрезами полукруглого профиля (рис. 1, б) по вариантам, представленным на рис. 2. Установлено, что все закономерности, выявленные для сплошных цилиндрических деталей, справедливы и для плоских деталей, причём дополнительные напряжения на дне надреза практически не

зависят от размера H поперечного сечения. При больших значениях $D = H$ дополнительные напряжения в цилиндрических и плоских деталях совпадают, что иллюстрируется данными табл. 3. Кроме того, результаты, приведённые в табл. 3, указывают на достаточную точность расчётов МКЭ, т.к. расхождение в величинах дополнительных напряжений для плоских деталей, вычисленных МКЭ и с использованием аналитического метода, не превышает 2,1 % (вариант 5).

Таким образом, по результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

Таблица 3. Дополнительные остаточные напряжения на дне надреза полукруглой формы $R = 0,3$ мм для плоских и цилиндрических деталей

Вариант	$\frac{S_z(x)}{S_0}$	$\frac{S_{z\partial}(1)}{S_0}$, аналитическая зависимость	$\frac{S_{z\partial}(1)}{S_0}$, численный метод			
			$H = 10$ мм	$D = 10$ мм	$H = 50$ мм	$D = 50$ мм
1	$1 - \sqrt{1 - x^2}$	0,734	0,730	0,743	0,733	0,735
2	x^2	1,023	1,021	1,042	1,024	1,026
3	x	1,296	1,309	1,319	1,303	1,296
4	$1 - (1 - x)^2$	1,590	1,592	1,621	1,591	1,587
5	$2x\sqrt{1 - x^2}$	1,324	1,344	1,388	1,352	1,356
6	$(1 - x)^2$	0,477	0,475	0,511	0,477	0,484
7	$1 - x$	0,771	0,762	0,813	0,765	0,775
8	$1 - x^2$	1,044	1,048	1,090	1,044	1,045
9	$\sqrt{1 - x^2}$	1,333	1,338	1,389	1,335	1,336
10	1	2,067	2,068	2,132	2,068	2,071

1. При одинаковой площади эпюр остаточных напряжений гладкой детали в случае ОППД б́льшие дополнительные напряжения и, соответственно, б́льшее сопротивление усталости будет наблюдаться тогда, когда б́льшие ординаты эпюр остаточных напряжений смещены к дну надреза.

2. С увеличением размеров поперечного сечения детали при ОППД значения дополнительных остаточных напряжений, определенных численным методом, приближаются к значениям напряжений, полученным по аналитической зависимости.

3. Для полых цилиндрических деталей с надрезом дополнительные остаточные напряжения, вызванные ОППД, определяются толщиной стенки, не зависят от диаметра и равны напряжениям сплошной детали, диаметр которой составляет удвоенную толщину стенки полой детали.

4. Дополнительные остаточные напряжения для плоских деталей при ОППД практически равны таковым для цилиндрических деталей с одинаковыми размерами поперечного сечения и надреза.

References

I. V. Kudryavtsev, L. I. Rosenman. Endurance of surface cold-working riveted beads with notches // Metal science and thermal working of metals, 1961. – No. 3 – pp. 75-77.

S. I. Ivanov, V. F. Pavlov. Impact of residual stresses and cold-work hardening on fatigue strength.

V. F. Pavlov. Influence of the character of residual stress distribution over the thickness of the part surface layer on endurance strength // Izvestiya vuzov (News from universities). Mashinostroyeniye (Machine building) – 1987.

Библиографический список

1. Кудрявцев, И. В. Выносливость поверхностно наклёпанных валиков с надрезами / И. В. Кудрявцев, Л. И. Розенман // Металловедение и термическая обработка металлов, 1961. – №3. – С. 75–77.

2. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность / С. И. Иванов, В. Ф. Павлов // Проблемы прочности, 1976. – №5. – С. 25–27.

3. Павлов, В. Ф. Влияние характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали на сопротивление усталости / В. Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение, 1987. – № 7. – С. 3–6.

4. Павлов, В.Ф. Влияние теплофизических характеристик материала на распределение остаточных напряжений у поверхности детали / В. Ф. Павлов // Вестник машиностроения, 1986. – №5. – С. 23–24.

5. Иванов, С.И. Определение дополнительных остаточных напряжений в надрезах на цилиндрических деталях / С. И. Иванов, М. П. Шатунов, В. Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций: Труды КуАИ. – Куйбышев, вып. 60. – С. 160–170.

– No. 7 – pp. 3-6.

V. F. Pavlov. Influence of thermophysical properties of metal on residual stress distribution at the surface of a part // Vestnik mashinostroyeniye (Bulletin of machine building), - 1986 – No. 5 – pp. 23-24.

S. I. Ivanov, M. P. Shatunov, V.F. Pavlov. Determination of additional residual stresses in notches on cylindrical parts // Issues of aircraft construction element strength // Collection of KuAI (Kuibyshev Aviation Institute) transaction. – Kuibyshev, issue 60 – pp. 160-170.

**IMPACT OF SMOOTH PART RESIDUAL STRESS
DISTRIBUTION ON ADDITIONAL STRESSES IN CASE
OF LEADING SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

© 2008 V. F. Pavlov, V. A. Kirpichyov, Ye. A. Deniskina, O. Yu. Semyonova

Samara State Aerospace University

The paper deals with distributions of residual stresses of reinforced smooth part as well as additional compressing residual stresses after making a semicircular profile notch. Various laws of changing axial residual stresses of a smooth part which simulate practically all possible cases of their distribution after reinforcing the parts by known methods of surface plastic deformation are also discussed.

Leading surface plastic deformation, residual stresses, stress concentration, residual stress redistribution

Информация об авторах

В. Ф. Павлов, заведующий кафедрой сопротивления материалов, доктор технических наук, профессор. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

В. А. Кирпичёв, доцент кафедры сопротивления материалов, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

Е. Ф. Денискина, доцент кафедры высшей математики, кандидат технических наук. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

О. Ю. Семёнова, старший преподаватель кафедры высшей математики. Область научных интересов: механика остаточных напряжений.

V. F. Pavlov, Head of Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Science, Professor. Area of research: residual stresses mechanics.

V. A. Kirpichyov, Associate Professor of Department of Strength of Materials, senior lecturer. Area of research: residual stresses mechanics.

Ye. A. Deniskina, Associate Professor of Department of Higher Mathematics, Candidate of Technical Science. Area of research: residual stresses mechanics.

O. Yu. Semyonova, lecturer of the Department of Higher Mathematics. Area of research: residual stresses mechanics.