Общероссийский математический портал

В. Ф. Павлов, С. А. Бордаков, Ю. Н. Сургутанова, А. П. Филатов, О. В. Караньева, Остаточные напряжения поверхностного слоя как критерий сопротивления усталости деталей, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2004, выпуск 26, 115–121

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu187>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.209.158.208

26 апреля 2023 г., 17:28:21

В.Ф. Павлов, С.А. Бордаков, Ю.Н. Сургутанова, А.П. Филатов, О.В. Каранева

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КАК КРИТЕРИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Приведены принципы построения математической модели формирования остаточных напряжений в поверхностном слое реальных элементов конструкций с учетом аномальных свойств поверхности материала. Показана высокая эффективность и достоверность методики прогнозирования предела выносливости детали, основанной на представленной математической модели. Приведены результаты усталостных испытаний образцов с концентраторами напряжений, изготовленных из различных материалов.

Снижение материальных затрат при создании и изготовлении более совершенных машин с одновременным повышением их срока службы, надежности, снижением веса является основной задачей современного отечественного машиностроения, транспорта, авиа- и ракетостроения, выполнение которой требует научного поиска, дальнейшего развития теоретических и экспериментальных работ, повышения их качества. В свете этой задачи особое положение занимает проблема сопротивления усталости, т.к. она определяет, в основном, допустимый срок службы и в значительной степени влияет на выбор материалов и оптимальных технологических процессов.

В настоящем сообщении рассмотрены результаты исследования остаточного напряженно-деформируемого состояния в поверхностном слое деталей. В качестве объекта исследования были использованы цилиндрические образцы, изготовленные из сталей 45, 30ХГСА и 38Х2МЮА. Выбор материалов обусловлен следующими причинами. Сталь (как сплав) является структурно стабильным материалом и наиболее полно исследованным в литературе. Конкретные материалы были выбраны из расчета охвата с минимальными затратами всех классов сталей в зависимости от степени пластичности: сталь 45 является представителем высокопластичных сталей, сталь 30ХГСА - представитель переходного класса, а сталь 38Х2МЮА - представитель класса хрупких сталей. В результате испытаний образцов и соответствующей статистической обработки были получены математические ожидания механических характеристик применяемых материалов, которые приведены в табл.1. Здесь же представлены характеристики кривой деформирования, аппроксимированной зависимостью $s = ke^n$.

В дальнейшем под механическими характеристиками материалов будут иметься ввиду их математические ожидания. Все величины механических характеристик были заложены в математическую модель в качестве исходных данных. Кроме того, с целью подтверждения и уточнения данных по механическим свойствам ослабленного поверхностного слоя были проведены дополнительные исследования по специально разработанным методикам. В результате было выявлено, что для 30ХГСА изменение предела текучести на растяжение и на сжатие по толщине ослабленного слоя (рис.1) подчиняется линейному закону. В то же время для хрупких сталей типа 38Х2МЮА линейный закон изменения пределов текучести не выполняется, а наиболее подходящим является закон кубической параболы (см. рис.1). Механические характеристики ослабленного поверхностного слоя исследуемых материалов, приведенные в табл.2, были в дальнейшем использованы в качестве исходных данных при моделировании процесса формирования остаточных напряжений в деталях.

Цилиндрическая деталь, используемая в исследовании, представляет собой образец (рис.2), с нанесенными на него кольцевыми надрезами V-образного профиля (геометрические параметры приведены в табл.3).

Наличие у материалов ослабленного поверхностного слоя с чрезвычайно низкими механическими характеристиками дает основание считать, что процессы, проходящие в поверхностном слое при деформировании усилиями, численно равными пределу выносливости, носят сугубо упругопластический характер. Следовательно, математическое моделирование реальных изменений в поверхностных слоях, происходящих при этом нагружении, должно основываться на решении задачи, учитывающей физическую нелинейность постановки, т.е. с использованием теории пластичности.

В работе рассматриваются цилиндрические детали, находящиеся под действием осесимметричной нагрузки (растяжение-сжатие), т.е. рассматривается осесимметричная задача.

Р и с.1. Распределение по толщине ослабленного поверхностного слоя пределов текучести на сжатие σ_{TC} и растяжение σ_{TP} для материалов: сталь 45 (а), 30ХГСА (б), 38Х2МЮА (в)

Р и с.2. Цилиндрический образец с надрезами V-образного профиля.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики применяемых материалов

Марка стали	Сталь 45	30ХГСА	38Х2МЮА
Предел текучести на растяжение S_{TP} , МПа	420	518	820
Предел текучести на сжатие S_{TC} , МПа	462	622	1100
Соотношение S_{TC}/S_{TP}	1,10	1,20	1,34
Относительное удлинение d , %	27	15	8
Относительное сужение j , %	64	40	29
Предел прочности S_B , МПа	700	743	1046
Истинное сопротивление разрыву S_k , МПа	1372	1159	1471
Показатель степени кривой деформирования n	4,7	7,1	12,5
Характеристики обобщенной циклической диаграммы деформирования	A	3,55	1,7
	B	0	-0,835
	C	0	0,0115

Т а б л и ц а 2

Механические характеристики ослабленного поверхностного слоя

Материал	S_{TP}^V , МПа	S_{TC}^V , МПа	S_{TC}^V/S_{TP}^V	a^V , мкм	S_{TP}/S_{TP}^V
Сталь 45	130	310	2,38	200	3,2
30ХГСА	180	290	1,61	175	2,8
38Х2МЮА	324	396	1,22	155	2,53

В качестве диаграммы деформирования материала в математической модели была выбрана обобщенная циклическая диаграмма деформирования, рекомендованная ИПМ РАН России.

Рассмотрим случай нагружения образца с надрезами V-образного профиля осевой нагрузкой (растяжение-сжатие), изменяющейся по симметричному циклу. Предварительно были проведены испытания на усталость рассматриваемых образцов с целью определения предела вы-

носливости. Результаты испытаний на усталость образцов, изготовленных из используемых в работе материалов, приведены в табл.4. Здесь величина s_{-1P}^f , в отличие от s_{-1P} , соответствует пределу выносливости образцов с надрезами V-образного профиля диаметром 5 мм в наименьшем сечении. Величина эффективного коэффициента концентрации напряжений k_s вычислялась по формуле $k_s = P_{-1}/P_{-1}^0$. Из данных табл.4 следует, что k_s во всех случаях меньше соответствующего теоретического коэффициента концентрации напряжений a_s .

Т а б л и ц а 3

Геометрические параметры надреза V-образного профиля

№ варианта	D, мм	d, мм	a, мм	t, мм	R, мм	w, град.
1 (а)	10,0	5,0	2,5	2,5	0,50	65
2 (б)	10,0	5,0	2,5	2,5	0,25	50
3 (в)	10,0	5,0	2,5	2,5	2,00	80

Перейдем далее к рассмотрению результатов теоретических расчетов распределения остаточных напряжений по построенной математической модели. Будем считать, что нагрузка в процессе испытаний на усталость изменяется по стационарно циклическому закону (рис.3). За остаточные будем принимать напряжения, которые наблюдаются в образце в момент, когда нагрузка, изменяющаяся по гармоническому закону, проходит через свое нулевое значение.

Одной из основных закономерностей, выявленных теоретическим путем для гладких образцов - циклическое изменение остаточных напряжений в процессе циклического нагружения, была подтверждена и в случае образцов с надрезами V-образного профиля, т.е. в условиях концентрации напряжений. В качестве характеристики среднего за полный цикл нагружения уровня остаточных напряжений в точке поверхностного слоя использовалась величина

$$s_{jост}^{\nabla} = \frac{s_{jост}^{(1)} + s_{jост}^{(2)}}{2},$$

т.к. примерно эта величина устанавливается в поверхностном слое образца после разгрузки. В формуле $s_{jост}^{(1)}$ и $s_{jост}^{(2)}$ - остаточные напряжения после цикла растяжения и цикла сжатия соответственно. Результаты расчета величины $s_{jост}^{\nabla}$ в ослабленном поверхностном слое цилиндрических образцов с надрезами V-образного профиля, изготовленных из стали 45, представлены на рис.4,а для других материалов - на рис.5. Здесь коэффициент перегрузки k_v ($k_v=0,8-1,6$) вычислялся по формуле $k_v = F/P_{-1}^f$, где F - величина амплитуды внешней нагрузки; P_{-1}^f - величина амплитуды внешней нагрузки, соответствующая пределу выносливости образца с надрезом V-образного профиля при симметричном цикле. Из рис.4 видно, что для всех используемых материалов наблюдается основная тенденция - с увеличением амплитуды внешней нагрузки сжимающие остаточные напряжения $s_{jост}^{\nabla}$ возрастают до некоторого предела, обусловленного соотношением пределов текучести на растяжение и сжатие на данной глубине и общих закономерностей протекания пластической деформации в ослабленном поверхностном слое. С увеличением амплитуды P глубина залегания остаточных напряжений увеличивается до предельного значения, равного толщине ослабленного поверхностного слоя.

Характер изменения пределов текучести на растяжение и сжатие, степень пластичности материала обуславливают определенные закономерности распределения остаточных напряжений. Наибольшая величина сжимающих остаточных напряжений $s_{jост}^{\nabla}$ у более пластичной стали 45 (рис.4) выше, чем у более хрупкой стали 38Х2МЮА. Соотношение наибольших остаточных напряжений для пластичной стали 45 и хрупкой 38Х2МЮА достигает величины 1,25. Это соотношение для пластичной стали 45 и стали переходного класса 30ХГСА составляет 1,16. Характер распределения остаточных напряжений $s_{jост}^{\nabla}$ отличается для пластичных и хрупких сталей. Проследим это на примере кривых распределения, соответствующих коэффициенту перегрузки $k_v=1$, по толщине поверхностного слоя от 0 до t_{KP} , где t_{KP} - критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости для образцов, первоначально свободных от остаточных напряжений. Остаточные напряжения именно на этой глубине, оказывают влияние на сопротивление усталости деталей в многоциклового области.

Для пластичной стали 45 до t_{KP} наблюдаются практически постоянные сжимающие остаточные напряжения $S_{j\text{ост}}^{\nabla}$, в то время как для хрупкой стали 38Х2МЮА имеется некоторый их спад к поверхности. Кроме того, при одинаковом коэффициенте перегрузки для пластичной стали 45 глубина залегания остаточных напряжений $S_{j\text{ост}}^{\nabla}$ больше, чем для хрупкой стали 38Х2МЮА, в то время как эта величина для стали 30ХГСА занимает промежуточное значение. Однако все используемые в исследовании стали с контрастными механическими свойствами объединяет то, что при амплитуде внешней нагрузки, соответствующей пределу выносливости материала, наблюдается максимальная полнота эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, равной t_{KP} . Отклонение коэффициента перегрузки k_V от 1 в ту или другую сторону приводит к уменьшению полноты эпюры на глубине t_{KP} , причем при уменьшении k_V это изменение более заметно.

В качестве величины, характеризующей распределение остаточных напряжений в поверхностном слое детали толщиной t_{KP} , был принят интегральный критерий остаточных напряжений, используемый на кафедре сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета. Этот критерий получен из аналитической зависимости для концентратора полуэллиптического профиля и вычисляется по формуле

$$\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla} = \frac{2}{p} \int \frac{S_{j\text{ост}}^{\nabla}}{\sqrt{1-x^2}} dx,$$

где $x=y/t_{KP}$ - расстояние от поверхности до текущего слоя, выраженное в долях t_{KP} .

Для вычисления критерия применялся численный метод интегрирования по формуле Симпсона с 11 точками интегрирования. Результаты расчетов критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ для эпюр, показанных на рис.4 и 5, представлены в табл.5 и на рис.6. Можно видеть, что для всех используемых материалов наблюдается экстремум величины критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ при значении коэффициента перегрузки, равном единице, т.е. при амплитуде внешней нагрузки, соответствующей пределу выносливости материала в случае симметричного цикла. Это позволило предположить возможность теоретического прогнозирования величины предела выносливости материала по известным механическим характеристикам ослабленного поверхностного слоя. Определяя расчетным путем экстремум критерия остаточных напряжений в зависимости от амплитуды внешней нагрузки, мы, тем самым, получаем соответствующее ему значение предела выносливости.

Отметим, что величина критерия остаточных напряжений существенно зависит от пластичности используемого материала. Так, при $k_V=1$ для пластичной стали 45 этот критерий больше, чем для стали 30ХГСА, на 14% и для стали 38Х2МЮА – на 30%. Характер изменения критерия остаточных напряжений в зависимости от коэффициента перегрузки (рис.6) примерно одинаков для всех материалов. Можно лишь отметить, что для хрупких материалов при $k_V>1$ наблюдается более высокий градиент изменения критерия, чем у пластичных.

До сих пор рассматривались меридиональные остаточные напряжения. Кратко остановимся на окружных остаточных напряжениях $S_{q\text{ост}}^{\nabla}$. Как показали расчеты, окружные остаточные напряжения имеют значительно меньшую величину, чем соответствующие меридиональные - они составляют величину порядка 15-20% последних. Учитывая этот факт и известное положение о том, что окружные остаточные напряжения оказывают гораздо меньшее влияние на усталость, в работе напряжениями $S_{q\text{ост}}^{\nabla}$ пренебрегали.

Р и с.3. Схема стационарно циклического нагружения при растяжении-сжатии.

Р и с. 4. Распределение меридиональных остаточных напряжений S_{jOCT}^V в поверхностном слое наименьшего поперечного сечения образцов с надрезом $\alpha_\sigma=2,77$ (а), $\alpha_\sigma=3,76$ (б), $\alpha_\sigma=1,62$ (в), изготовленных из стали 45, при циклическом растяжении-сжатии:
1 - $k_v=0,7$, 2 - $k_v=0,85$, 3 - $k_v=1,0$, 4 - $k_v=1,6$.

Р и с. 5. Распределение меридиональных остаточных напряжений S_{jOCT}^V в поверхностном слое наименьшего поперечного сечения образцов, изготовленных из сталей 30XГСА (а) и 38Х2МЮА (б), с надрезами:
1 - $\alpha_\sigma=2,77$, 2 - $\alpha_\sigma=3,76$, 3 - $\alpha_\sigma=1,62$ при $k_v=1,0$

Р и с. 6. Критерий остаточных напряжений образцов с надрезами V-образного профиля:
1 - $\alpha_\sigma=3,76$, 2 - $\alpha_\sigma=2,77$, 3 - $\alpha_\sigma=1,62$, изготовленных из стали 45, при растяжении-сжатии в зависимости от коэффициента перегрузки k_v

Т а б л и ц а 4

Характеристики сопротивления усталости образцов с надрезами V-образного профиля при испытаниях на растяжение-сжатие

Материал	Вариант	S_{-1P}^f , МПа	k_s	$\frac{a_s - k_s}{a_s} 100$, %
Сталь 45	1	117	2,51	9,26
	2	88	3,34	11,05
	3	196	1,50	7,12
30XГСА	1	143	2,56	7,45
	2	98	3,44	8,39
	3	220	1,53	5,26
38X2МЮА	1	183	2,60	5,70
	2	137	3,47	7,32
	3	303	1,57	2,79

Т а б л и ц а 5

Значение критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ в МПа образцов с надрезами V-образного профиля, изготовленных из стали 45 в зависимости от коэффициента перегрузки при растяжении-сжатии

a_s	Коэффициент перегрузки k_v			
	0,7	0,85	1,0	1,6
2,77	-15,0	-92,0	-100,9	-91,7
3,76	-24,0	-106,4	-116,0	-96,7
1,62	-37,2	-86,4	-92,5	-88,5

В зависимости от степени концентрации напряжений изменяется величина критерия $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ - с возрастанием a_s критерий $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ при $k_v=1$ увеличивается. Это увеличение для $a_s=3,76$ по сравнению с гладкими образцами составило 38%. Уменьшение критерия остаточных напряжений с увеличением k_v от 1,0 до 1,6 при $a_s=3,76$ составило 16,7%, при $a_s=2,77$ - 9,1%, при $a_s=1,62$ - 4,3%. Точка перехода критерия через нулевое значение с возрастанием степени концентрации смещается в сторону больших значений коэффициента перегрузки. Аналогичные закономерности были отмечены и для образцов из других материалов. Поэтому остальные результаты расчета критерия $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ были представлены в зависимости от степени концентрации напряжений в табл.6 и на рис.7. Анализ этих результатов показывает, что с возрастанием a_s увеличение критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ наблюдается для всех используемых в работе материалов.

С уменьшением пластичности материала влияние a_s сказывается в меньшей степени. Так для стали 45 увеличение $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ происходит на 38% при изменении a_s от 1,0 до 3,76, в то время как для стали 38Х2МЮА эта величина составляет 31,4%.

Т а б л и ц а 6

Значение критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^{\nabla}$ в МПа образцов с надрезами V-образного профиля в зависимости от степени концентрации напряжений при растяжении-сжатии $k_v=1,0$

Материал	α_σ			
	1,0	1,62	2,77	3,76
Сталь 45	-84,1	-92,5	-100,9	-116,0
30ХГСА	-73,6	-84,2	-88,2	-94,3
38Х2МЮА	-64,2	-74,0	-79,6	-84,4

Т а б л и ц а 7

Сравнение расчетных и экспериментальных значений пределов выносливости

Материал	Вариант по табл.4	Растяжение-сжатие		Чистый изгиб	
		модель	Опыт	модель	опыт
Сталь 45	1	121	117	186	183
	2	93	88	151	147
	3	201	196	294	293
30ХГСА	1	150	143	203	197
	2	102	98	159	153
	3	225	220	316	312
38Х3МЮА	1	186	183	259	258
	2	139	137	201	199
	3	304	303	418	416

Все эпюры распределения остаточных напряжений были построены для первых циклов нагружения. Однако в разработанной математической модели была заложена возможность изменения механических характеристик материала в зависимости от количества циклов нагруже-

ния. Эта возможность сводилась к изменению характеристик кривой упрочнения материала, в частности, показателя упрочнения. Расчетами показателя упрочнения для стали 30ХГСА установлено, что этот коэффициент увеличивается с увеличением количества циклов нагружения, причем наблюдаемое изменение составляет 19,8% для 20-ого цикла по сравнению с первым. Расчеты же распределения остаточных напряжений в исследуемом диапазоне величин амплитуд внешних нагрузок показали, что как качественные, так и количественные изменения незначительны и составляют величину порядка 2% от первых циклов нагружения. Следовательно, можно сделать вывод, что количество циклов нагружения с точки зрения теоретической математической модели практически не влияет на распределение остаточных напряжений $S_{j\text{ост}}^V$, а, значит, и на критерий остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^V$.

Остановимся далее на следующей закономерности наблюдающееся максимальное значение критерия сжимающих остаточных напряжений в случае, когда коэффициент перегрузки равен единице. Как уже было показано, эта закономерность справедлива независимо от вида простой деформации, степени концентрации напряжений и пластичности материала и указывает на момент достижения амплитудой внешней нагрузки своего экстремального значения, соответствующего пределу выносливости образца или детали. Следовательно, максимальная величина критерия остаточных напряжений $\bar{S}_{j\text{ост}}^V$, учитывающая механические характеристики ослабленного поверхностного слоя, степень концентрации напряжений, вид простой деформации может служить обобщающим интегральным параметром, определяющим величину предела выносливости детали при симметричном цикле. На основе этой закономерности, по разработанной математической модели были проведены вычисления, позволившие получить расчетные значения пределов выносливости образцов с надрезами V-образного профиля. Результаты прогноза величин S_{-1P} и S_{-1} представлены в табл.7, откуда видно, что расчетные значения пределов выносливости близки к экспериментальным. На основании данных табл.7 можно заключить, что значения эффективного коэффициента концентрации напряжений, вычисленные с использованием расчетных и экспериментальных величин пределов выносливости, практически не отличаются.

Р и с. 7. Критерий остаточных напряжений образцов с надрезами V-образного профиля, изготовленных из сталей 45 (1), 30ХГСА (2), 38Х2МЮА (3), при растяжении-сжатии $k_V=1,0$

Поступила 21.11.2003 г.