Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Ф. Павлов, С. А. Бордаков, Ю. Н. Сургутанова, О. В. Каранаева, Т. А. Хибник,
Прогнозирование предела выносливости по разрушению деталей, изготовленных
методами опережающего поверхностного пластического деформирования, *Вестн.
Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2005, выпуск 34, 60–67

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu338>

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: 54.164.48.24

26 апреля 2023 г., 17:53:47

Механика деформируемого твердого тела

УДК 539.319

В.Ф. Павлов, С.А. Бордаков, Ю.Н. Сургутанова, О.В. Каранева, Т.А.Хибник

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПО РАЗРУШЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДАМИ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Изложены принципы построения математической модели перераспределения остаточных напряжений в поверхностном слое реальных элементов конструкций, обработанных опережающим поверхностным пластическим деформированием с учетом аномальных свойств поверхности материала. Показана высокая эффективность и достоверность методики прогнозирования предела выносливости детали по разрушению, основанной на представленной математической модели. Приведены результаты усталостных испытаний образцов с концентраторами напряжений, изготовленных из различных материалов и с использованием различных упрочняющих обработок методами опережающего поверхностного пластического деформирования.

Математическая модель возникновения остаточных напряжений в деталях после образования концентратора. В работе рассматривается случай технологического упрочнения поверхностного слоя детали путем опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). Этот метод упрочнения подразумевает собой цилиндрическую гладкую деталь, подвергающуюся поверхностной пластической деформации с последующим нанесением безнаклепным способом концентраторов. Глубина концентратора должна быть больше толщины наклепанного поверхностного слоя гладкой детали. Тогда поверхностный слой дна концентратора находится в состоянии, аналогичном рассматриваемому в работе [1] – физически неоднородному ослабленному поверхностному слою. В тоже время дно концентратора вызывает наибольший интерес с точки зрения процессов, происходящих в материале при эксплуатационных нагрузках.

В наименьшем сечении детали после образования концентратора образуются остаточные напряжения в результате эффекта, называемого перераспределением остаточных напряжений после удаления части материала в пределах концентратора. Схема нагружения расчетной области детали Ω в этом случае для надреза полукруглого профиля показана на рис. 1. На рис. 2 интенсивность нагрузки q_z , представляет собой распределение остаточных напряжений гладкой детали по толщине упрочненного слоя $a_{\text{упр}}$. Следовательно, условием разработки математической модели является неравенство $R > a_{\text{упр}}$.

Таким образом, в общем случае постановка задачи формулируется следующим образом: требуется определить дополнительные остаточные напряжения $\sigma_{\text{ост.}}^{\text{доп.}}$, вызванные перераспределением остаточных напряжений гладкой детали с учетом физически нелинейного характера деформирования поверхностного слоя дна надреза.

В такой постановке задача решается впервые. Существующие аналитические и численные решения не учитывали физическую нелинейность деформирования поверхностного слоя.

Следовательно, поставленная проблема сводится к решению задачи теории пластичности. Факт возникновения в поверхностном слое наименьшего сечения детали пластической деформации при перераспределении остаточных напряжений в ОППД носит название повторного пластического деформирования при ОППД.

В поставленной задаче нагружение расчетной области подчиняется закону простого пропорционального нагружения. Поэтому выбор теории пластического течения в качестве основы решения представляется в нашем случае вполне обоснованным.

Вышеизложенную задачу необходимо решать численным методом, в качестве которого наиболее подходящим является метод конечных элементов. Данная математическая модель в

своей постановке схожа по решению с математической моделью, описанной в работе [1]. Отличие состоит в задании силовых граничных условий: здесь вектор нагрузки действует в пределах границы DC (см. рис. 1). Дополнительные остаточные напряжения определялись в момент достижения внешней нагрузкой величины остаточных напряжений гладкой детали.

Математическая модель перераспределения остаточных напряжений в деталях после ОППД при циклическом нагружении. Целью создания математической модели перераспределения остаточных напряжений при циклическом нагружении являлась необходимость выявления закономерностей распределения остаточных напряжений в физически неоднородном поверхностном слое при циклическом нагружении. Факт перераспределения остаточных напряжений при циклическом нагружении амплитудами внешней нагрузки, соответствующими пределу выносливости, не вызывает сомнений в связи с принятой гипотезой о наличии у наклепанного поверхностного слоя аномально низких механических характеристик. Математическая модель перераспределения остаточных напряжений фактически получается путем суммирования модели образования остаточных напряжений при ОППД и модели формирования остаточных напряжений при циклическом нагружении неупрочненных деталей. Это определяет и путь решения данной проблемы:

используя математическую модель образования остаточных напряжений после ОППД, определяются остаточные напряжения в поверхностном слое дна надреза;

используя математическую модель работы [1] с несколько иными исходными данными, включая результаты предыдущего шага, определяются остаточные напряжения при циклическом воздействии внешней нагрузки.

Такой путь решения удовлетворяет механико-физическому принципу проблемы.

Отметим, что при этом не нарушается принцип пропорциональности нагружения. В то же время само нагружение уже необходимо отнести к классу сложных. На всех этапах математической модели необходимо решать, в общем случае, упругопластическую задачу при сложном нагружении (рис. 3), в связи с тем, что главное направление тензора напряжений меняет свое направление в процессе перехода от первого этапа ко второму.

Р и с. 1. Расчетная область цилиндрической детали с надрезом

Р и с. 2. Геометрические и силовые граничные условия

Р и с. 3. Геометрические и силовые граничные условия

Таким образом, выявляется основная трудность в решении данной задачи. В то же время выбранная в качестве теоретической основы на обоих этапах теория пластического течения не теряет свою работоспособность и точность даже в случае сложных нагружений. Исследование литературы по этому вопросу, в частности исследование [1], показывает, что уточненные способы решения, например с помощью учета деформационного упрочнения материала, дает результаты, схожие с опытными при деформациях значительно выше 1. В то же время утверждается, что значительная невязка при решении задачи сложного нагружения с помощью теории пластического течения сказывается при значительных пластических деформациях (более 1). Все эти соображения подтверждают справедливость гипотезы – при исследовании поведения мате-

риала ослабленного поверхностного слоя в пределах многоциклового усталости неточности учета сложного нагружения в разрабатываемых математических моделях считались достаточно малыми и не учитывались. Данная гипотеза использовалась при построении математической модели перераспределения остаточных напряжений в деталях после ОППД. Дальнейшие расчеты и их совпадение с экспериментальными данными показали справедливость данного утверждения.

Следует заметить, что знание механических характеристик упрочненного слоя CDEF (см. рис. 1) в обеих математических моделях не обязательно, так как область упрочненного слоя детали не входит в область пластических деформаций дна надреза, а это, конечно, значительно упрощает решение задачи.

В качестве исходных данных для обеих математических моделей служат механические характеристики ослабленного поверхностного слоя, определяющиеся по специально разработанной расчетно-экспериментальной методике, и остаточные напряжения гладкой детали. Эти остаточные напряжения определяются экспериментальным способом с использованием известных разрушающих методов.

Теоретико-экспериментальное исследование остаточных напряжений, формирующихся при ОППД, с использованием математической модели. Для создания остаточных напряжений в гладких образцах применялись следующие методы поверхностного упрочнения: обработка микрошариками (ОМ), гидродробеструйная обработка (ГДО), обкатка роликом (ОР), алмазное выглаживание (АВ), ультразвуковое упрочнение (УЗУ) с последующей термоэкспозицией (ТО). Обработка микрошариками проводилась на роторной установке шариками диаметром 0,10 – 0,15 мм в течение 3-х минут. Режимы остальных видов обработок приведены в табл. 1. Гладкие образцы изготавливались диаметром, равным внешнему диаметру образцов с надрезами. Варианты упрочняющих обработок гладких образцов представлены в табл. 2. Соответствующие эпюры остаточных напряжений гладких образцов, изготовленных из материалов по вариантам табл. 2, приведены на рис. 4 – 7. На гладкие упрочненные образцы наносились надрезы фасонным резцом с последующим электрополированием по контуру надреза с целью снятия наклепанного точением слоя материала толщиной 40-50 мкм. Этот способ нанесения надреза носит название безнаклепного. Как видно из рис. 4-7, наименьшая толщина наклепанного слоя (меньше 200 мкм) наблюдается у гладких образцов, обработанных микрошариками, а наибольшая глубина – после обработки роликом. Данная закономерность предопределила варианты подготовки поверхности гладких образцов перед нанесением конкретных типоразмеров надрезов по табл. 2 для получения классического варианта ОППД с ненаклепанным материалом на дне концентратора.

Т а б л и ц а 1

Варианты и режимы упрочняющих обработок

Обработка	Вариант	Давление масла, Р, МПа	Диаметр шариков	Время обработки	Усилие накатывания (выглаживания)	Число оборотов образца	Подача	Диаметр ролика	Профильный радиус ролика (алмаза)
		Р, мм	d _ш , мм		Q, кН	n, об/ мин	S, мм/об	D, мм	R _{пр} мм
Обработка микрошариками	1		0,10-0,15	3					
Гидродробеструйная обработка (ГДО)	2	0,28	2	8					
Обкатка роликом (ОР)	3				0,5	400	0,11	60	1,6
Алмазное выглаживание (АВ)	4				0,1	160	0,05		2,0
Ультразвуковое упрочнение и ТО*	5		0,68	60					

ТО* - термоэкспозиция Т=700 °С в течение 1000 часов

Дополнительные остаточные напряжения (в дальнейшем просто остаточные напряжения) в деталях с надрезами определялись с использованием математической модели формирования ос-

таточных напряжений при ОППД с учетом физической неоднородности поверхностного слоя.

Результаты расчетов меридиональных остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ в наименьшем сечении для деталей с надрезами, изготовленными из характерных материалов каждой группы при различных вариантах упрочняющих обработок, представлены на рис. 8-10. Следует отметить, что на рисунках изображены кривые распределения остаточных напряжений, учитывающие как дополнительные остаточные напряжения, вызванные нанесением надреза, так и существующие остаточные напряжения на этой глубине до нанесения надреза.

Т а б л и ц а 2

Комбинации вариантов упрочняющих обработок гладких образцов

Материал		Вариант надреза, наносимых на гладкий образец						
		9	10	11	12	13	14	15
		Теоретический коэффициент концентрации						
		2,51	2,76	2,58	2,19	2,86	2,73	2,46
Сталь 45(1)	1	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
Сталь 40Х	2	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
12Х18Н10Т	3	ОМ, ГДО	ОМ, ГДО	ОМ, ГДО	ОР	ОМ, ГДО	ОМ, ГДО	ОР
30ХГСА(1)	4	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
Ст. 45(2)	5	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
13Х1Н2В2МФ	6	ОМ	ОМ	ГДО, АВ	ГДО, АВ	ОМ	ГДО, АВ	ГДО, АВ
30ХГСА(2)	7	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
38Х2МЮА	8	ОМ	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО	ОМ	ОМ, ГДО	ОР, ГДО
ЭИ698ВД	9	УЗУ+ТО	УЗУ+ТО	УЗУ+ТО		УЗУ+ТО	УЗУ+ТО	
ЖС6У	10	УЗУ+ТО	УЗУ+ТО	УЗУ+ТО		УЗУ+ТО	УЗУ+ТО

Р и с. 4. Остаточные напряжения в гладких образцах после обработки микрошариками(ОМ) по вариантам табл. 2

Р и с. 5. Остаточные напряжения в гладких образцах после гидроабразивной обработки (ГЛО) по вариантам табл. 2

Р и с. 6. Остаточные напряжения в гладких образцах после обкатки роликом (ОР) (1-5, 7-8) и

Р и с. 7. Остаточные напряжения в гладких образцах после ультразвукового упрочнения (УЗУ и термоэкспозиции) по

Р и с. 8. Распределение меридиональных остаточных напряжений в образцах из стали 45(1) остаточных напряжений в образцах из стали с надрезами по вариантам табл. 2 и вариантам ОППД согласно

табл. 1

Р и с. 10. Распределение меридиональных остаточных напряжений в образцах из стали 38Х2МЮА с надрезами по вариантам табл. 2 и вариантам ОППД согласно табл. 1

Р и с. 9. Распределение меридиональных 30ХГСА(1) с надрезами по вариантам табл. 2 и вариантам ОППД согласно табл. 1

Кривые распределения на рис. 8-10 представлены с маркировкой, расшифровка которой выглядит следующим образом – кривая на рис. 8, обозначенная как 12(2), соответствует кривой распределения 12 вида концентратора по табл. 2. (полукруглый надрез радиусом 1,0 мм, нанесенный на гладкую деталь диаметром 10 мм) и 3 вида упрочняющей обработки ОППД по табл. 1 (обкатка роликом).

Основные закономерности, выявленные выше расчетным путем в работе [1], полностью подтвердились и здесь.

Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения, имея максимум на поверхности надреза или вблизи ее, быстро уменьшаются по толщине поверхностного слоя. Необходимо обратить внимание на то, что расчет по математической модели дополнительных остаточных напряжений имел упругий характер (в результате приложения расчетной нагрузки - остаточных напряжений гладкой детали – превышения предела текучести ослабленного поверхностного слоя ни на какой глубине не достигалось). На этот факт указывает и характер распределения остаточных напряжений.

В случае же вариантов 11(2) на рис. 9 и 12(3) на рис. 8 (полукруглый надрез радиусом 0,5 мм, нанесенный на гладкую деталь из 38Х2МЮА, упрочненную гидродробеструйной обработкой и надрез радиусом 1,0 мм, нанесенный на гладкую деталь из 30ХГСА, упрочненную обкаткой роликом) наблюдалось возникновение повторных пластических деформаций. Данный факт повлиял и на характер распределения – на кривых имеется подповерхностный максимум, определяемый как величиной, так и распределением предела текучести на сжатие ослабленного поверхностного слоя для материалов 30ХГСА и 38Х2МЮА.

Кроме того, следует отметить, что эффект ОППД значительно теряет свою эффективность при увеличении глубины впадины концентратора при сохранении толщины упрочненного слоя. Аналогичные кривые распределения были получены для других сочетаний исследуемых материалов, упрочняющих обработок и типоразмеров образцов. Выявленные закономерности подтверждаются и в этих случаях.

Часть образцов с надрезами в дальнейшем подвергались испытаниям на усталость с целью экспериментального определения предела выносливости.

Рассмотрим случай циклического симметричного растяжения-сжатия. Перейдем далее к

рассмотрению результатов теоретических расчетов распределения остаточных напряжений по математической модели при циклическом нагружении. Будем считать, что нагрузка в процессе испытаний на усталость изменяется по стационарно-циклическому закону. За остаточные будем принимать напряжения, которые наблюдаются в образце в момент, когда осевая нагрузка, изменяющаяся по гармоническому закону, проходит через свое нулевое значение.

Одна из основных закономерностей, выявленных теоретическим путем в работе [1], – циклическое изменение остаточных напряжений в процессе циклического нагружения – была подтверждена и в случае образцов с надрезами, упрочненных ОППД.

В качестве характеристики среднего за полный цикл нагружения уровня остаточных напряжений в точке поверхностного слоя использовалась величина средних за полный цикл нагружения остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}$. Результаты расчета величины $\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}$ в физически неоднородном поверхностном слое цилиндрических образцов с надрезами полукруглого профиля, изготовленных из стали 45(1) и упрочненных ОППД, представлены на рис. 11. Из данных рис. 11 видно, что с возрастанием коэффициента перегрузки от $K_v = 0$ до $K_v = 1$ и выше наблюдается перераспределение эпюры остаточных напряжений, характеризующееся снижением уровня остаточных напряжений на поверхности с увеличением полноты эпюры за счет приращения остаточных напряжений на глубине $0,5 - 1,0 t_{\text{кр}}$ и глубже, где $t_{\text{кр}}$ – глубина нераспространяющейся трещины усталости.

Расчеты показали, что на характер перераспределения остаточных напряжений влияет не только исходная кривая остаточных напряжений перед циклическим нагружением, но и характер распределения пределов текучести по толщине поверхностного слоя и соотношение пределов текучести на поверхности, а, следовательно, и степень пластичности материала. Как показали расчеты при одной и той же исходной эпюре остаточных напряжений перед циклическим нагружением зона увеличения уровня остаточных напряжений расположена ближе к поверхности и уровень остаточных напряжений выше, чем выше степень пластичности материала, а, следовательно, и больше соотношение пределов текучести на растяжение и сжатие на поверхности. С увеличением коэффициента перегрузки свыше 1 происходит значительное снижение остаточных напряжений на поверхности надреза. Аналогично ведут себя кривые распределения остаточных напряжений для других исследуемых материалов. Как показывают исследования работы [2], наиболее интересным с точки зрения усталостной прочности является зона поверхностного слоя в пределах глубины нераспространяющейся трещины усталости. Если проанализировать данные рис. 11, можно видеть, что в случае ОППД наблюдается основополагающая закономерность – независимо от способа упрочнения ОППД при коэффициенте перегрузки $K_v = 1$ наблюдается наибольшая полнота эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, равной глубине нераспространяющейся трещины усталости, которая зависит лишь от поперечных размеров сечения образца.

В качестве величины, характеризующей распределение остаточных напряжений в поверхностном слое впадины концентратора, был использован критерий остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}$, вычисляемый по формуле

$$\sigma_{\text{ост}}^{\nabla} = \frac{2}{\pi} \int \frac{\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi ,$$

где $\xi = y/t_{\text{кр}}$ – расстояние от поверхности до текущего слоя, выраженное в долях $t_{\text{кр}}$.

Результаты расчета этого критерия применительно к данным, представленным на рис. 11 для образцов, изготовленных из стали 45(1), 30ХГСА(1), 38Х2МЮА, приведены на рис. 12. Из анализа данных рис. 12 следует, что при коэффициенте перегрузки равном 1, наблюдается наибольшее значение интегрального критерия сжимающих остаточных напряжений независимо от способа упрочнения ОППД, материала и степени концентрации. Величину интегрального критерия остаточных напряжений определяет первоначальный уровень остаточных напряжений после ОППД, характеристики ослабленного поверхностного слоя и в меньшей степени – величина концентрации напряжений детали.

Из данных рис. 12 видно также, что влияние первоначального уровня остаточных напряжений ($K_v = 0$) сказывается в большей степени при увеличении остаточных напряжений после ОППД, т.е. чем эффективнее метод ОППД для данной детали, тем выше интегральный критерий остаточных напряжений при $K_v=1$.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлены три основных параметра, определяющих величину и характер распределения остаточных напряжений и, следовательно, критерия остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}$ и предела выносливости деталей с надрезами, упрочненных ОППД:

- распределение остаточных напряжений в наименьшем сечении детали после ОППД;
- механические характеристики физически неоднородного поверхностного наклепанного слоя дна концентратора;
- теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Методика прогнозирования предела выносливости деталей, изготовленных ОППД.

Основополагающая закономерность перераспределения остаточных напряжений, изложенная выше и заключающаяся в наличии экстремального значения критерия остаточных напряжений при нагрузке, соответствующей пределу выносливости, позволила разработать методику прогнозирования предела выносливости деталей с надрезами, изготовленных с использованием ОППД. Методика прогнозирования заключается в реализации следующих этапов:

по режимам ОППД исследуемой детали производится упрочнение гладкого электрополированного образца;

на гладких образцах определяется величина и распределение остаточных напряжений, наведенных различными способами ППД;

в зависимости от глубины концентратора, используемого в реальной детали, и толщины наклепанного слоя, составляющего величину на 40-50 мкм больше глубины залегания остаточных напряжений гладкой детали, решается вопрос о наличии классической схемы ОППД (превышение глубины надреза толщины наклепанного слоя); при соблюдении этого условия принимается решение о возможности применения методики прогнозирования;

из выбранного материала исследуемой детали изготавливаются электрополированные образцы как гладкие, так и с надрезами V-образной формы, необходимые для определения механических характеристик материала;

определяются макроскопические пределы текучести на растяжение и сжатие;

по специально разработанной расчетно-экспериментальной методике определяются величины и распределение пределов текучести на растяжение и сжатие ослабленного поверхностного слоя;

с использованием математической модели перераспределения остаточных напряжений при циклическом нагружении, применяя эксплуатационный вариант циклического нагружения, производится расчет для детали перераспределения остаточных напряжений и критерия влияния остаточных напряжений;

по результатам расчетов критерия остаточных напряжений в зависимости от величины амплитуды внешней нагрузки, ищется положение экстремального значения критерия; амплитуда нагрузки для экстремального значения критерия остаточных напряжений соответствует пределу выносливости детали.

Применяя вышеизложенную методику, были проведены расчеты по прогнозу предела выносливости исследуемого диапазона материалов, типоразмеров надрезов, вариантов ОППД, ре-

Р и с. 11. Перераспределение меридиональных остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}^{\nabla}$ в поверхностном слое наименьшего поперечного сечения образцов с надрезами изготовленных из стали 45(1) по вариантам табл. 2 10(а), 11(б), 12(в) и ОППД – ОМ(а), ГДО(б), ОР(в) при циклическом растяжении-сжатии:

1 - $K_v=0$, 2 - $K_v=0,85$, 3 - $K_v=1,0$, 4 - $K_v=1,6$

зультаты которых приведены для циклического растяжения-сжатия в табл. 3. Сравнение полученных экспериментальных данных и результатов расчетов по математической модели показывает достаточную точность разработанной методики прогнозирования предела выносливости.

Р и с. 12. Критерий остаточных напряжений образцов с надрезами полукруглого профиля по вариантам табл. 1 и 2 при циклическом растяжении-сжатии:

a – сталь 45(1), *б* – 30ХГСА(1), *в* – 38Х2МЮА

Т а б л и ц а 3

Значения предела выносливости МПа при растяжении-сжатии с видом ОППД по табл. 1:
a – эксперимент, *б* – модель

Материал		Вид обработ- ки	Вариант надреза, наносимых на гладкий образец											
			9		10		11		12		13		14	
			Теоретический коэффициент концентрации											
			2,51		2,76		2,58		2,19		2,86		2,73	
			<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>
Сталь 45	1	1	141	145	133	133	131	130			132	134	127	125
		2					152	158	162	162			148	153
		3							173	179				
30ХГСА	4	1	159	164	150	152	150	150			149	153	145	146
		2					170	171	182	185			165	165
		3							195	199				
12Х18Н10Т	3	1	106	108	100	101	98	98			99	101	94	94
		2					118	120	121	121			113	117
		3							132	134				
38Х2МЮА	8	1	217	223	203	207	206	209			201	206	199	201
		2					240	246	250	253			232	234
		3							262	267				
ЭИ698ВД	9	5	195	196	184	184	186	185			179	181	179	180

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бордаков С.А. Использование принципов механики остаточных напряжений в прогнозировании предела выносливости цилиндрических деталей // Проблемы машиностроения и автоматизации. №1. 1998. С. 73-80.
2. Павлов В.Ф., Лапин В.И., Бордаков С. А. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости детали прямоугольного поперечного сечения с концентраторами // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1989. № 1. С. 16-19.

Поступила 10.02.2005 г.