

В. Ф. ПАВЛОВ, В. С. ВАКУЛЮК, А. В. ЧИРКОВ, В. П. САЗАНОВ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Экспериментально установлено, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений. *Поверхностное упрочнение; прогнозирование предела выносливости; концентрация напряжений; критерий среднеинтегральных остаточных напряжений*

После поверхностного пластического деформирования (ППД) в поверхностном слое деталей изменяется структура, возникают наклёп и сжимающие остаточные напряжения. Известно [1], что основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами играют сжимающие остаточные напряжения. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей применяются два критерия. Первым критерием, использованным в работах [1–4], являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения предела выносливости $P_R(\sigma_R, \tau_R)$ упрочнённой детали в этом случае имеет вид

$$P_R = P_R^0 - \psi_P \cdot \sigma_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где $P_R^0(\sigma_R^0, \tau_R^0)$ – предел выносливости неупрочнённой детали, ψ_P – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости, $\sigma_{\text{ост}}$ – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора в наименьшем сечении детали. Другие компоненты остаточного напряжённого состояния в соответствии с третьей теорией предельных напряжённых состояний не участвуют, так как радиальные напряжения на поверхности концентратора $\sigma_p = 0$, а окружные σ_θ являются промежуточными главными напряжениями [5].

Обычно зависимость (1) записывается для приращения предела выносливости

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot |\sigma_{\text{ост}}|. \quad (2)$$

Первый критерий $\sigma_{\text{ост}}$, учитывающий остаточные напряжения на поверхности, может

быть применён для расчёта предела выносливости по трещинообразованию. Однако, как следует из литературных данных и наших исследований, при рассмотрении предела выносливости по разрушению формула (2) непригодна из-за значительного рассеяния коэффициента ψ_P , что можно было предвидеть в связи с наличием нераспространяющихся трещин усталости. Следует заметить, что практическое значение, в основном, имеет предел выносливости по разрушению.

На практике, при упрочнении деталей ППД, часто наблюдается подповерхностный максимум сжимающих остаточных напряжений, то есть к поверхности деталей напряжения уменьшаются. Этот спад зачастую является весьма существенным, иногда остаточные напряжения снижаются к поверхности до нуля и даже становятся растягивающими [6]. Однако увеличение предела выносливости по разрушению наблюдается и в этих случаях. Так, например, авторами исследования [7] определялись остаточные напряжения и сопротивление усталости азотированных и упрочнённых роликом стальных цилиндрических образцов. После нагрева и выдержки этих образцов при температуре 150 и 200 °С наблюдалось снижение сжимающих остаточных напряжений на поверхности и их увеличение на некотором расстоянии от неё, в результате чего повышался предел выносливости.

Всё изложенное выше говорит о том, что критерий оценки влияния поверхностного упрочнения деталей с концентраторами по остаточным напряжениям должен базироваться на учёте остаточных напряжений не только на поверхности, но и по толщине поверхностного слоя. Вначале необходимо установить толщину слоя с сжимающими остаточными напряжениями, ответственную за приращение предела выносливости.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённых деталях с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся усталостные трещины [3, 8, 9]. В связи с этой особенностью сопротивления усталости в исследовании [10] было предложено принять за критерий остаточные напряжения на дне нераспространяющейся трещины, в качестве которых следует рассматривать дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий упрочнённой детали в результате образования трещины. При этом исходные остаточные напряжения детали на дне трещины не учитываются в силу их малости по сравнению с дополнительными.

Для определения второго критерия в [10] использовалось решение задачи [11] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении детали после нанесения надреза полуэллиптического профиля на упрочнённую поверхность. Выделив основную часть решения [11], мы получили второй критерий влияния остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости упрочнённой детали в виде

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (3)$$

где $\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали, $\xi = y/t_{кр}$ – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$ (рис. 1), $t_{кр}$ – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

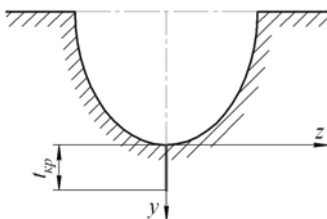


Рис.1. Нераспространяющаяся трещина усталости

Критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ имеет чётко выраженный физический смысл – это остаточное напряжение на дне трещины с точностью до постоянного коэффициента, зависящего от радиуса у дна трещины и её глубины. Приращение предела выносливости $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$ упрочнённой детали с концентратором напряжений при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (4)$$

где $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$ – коэффициент влияния остаточных напряжений по критерию $\bar{\sigma}_{ост}$ на предел выносливости по разрушению. В дальнейшем критерий $\bar{\sigma}_{ост}$ будем называть критерием среднеинтегральных остаточных напряжений.

В работе [12] для упрочнённых различными методами ППД деталей (образцов) из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров наименьшего поперечного сечения и для цилиндрической детали сплошного сечения определяется соотношением

$$t_{кр} = 0,0216 \cdot D, \quad (5)$$

где D – диаметр наименьшего поперечного сечения детали.

С целью проверки возможности использования обоих критериев для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе в случае симметричного цикла были проведены эксперименты на сплошных цилиндрических упрочнённых и неупрочнённых образцах из стали 20 с круговыми надрезами полукруглого профиля. Исследуемая сталь 20 имела следующие механические характеристики: $\sigma_T = 395$ МПа, $\sigma_s = 522$ МПа, $\delta = 26,1\%$, $\psi = 65,9\%$, $S_k = 1416$ МПа.

Гладкие образцы диаметром 10 мм и 25 мм подвергались пневмодробеструйной обработке (ПДО) дробью диаметром 1,5-2 мм при давлении воздуха 0,25 МПа в течение 10 минут, а также обкатке роликом (ОР) диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм при усилии $P = 0,5$ кН и $P = 1,0$ кН с подачей 0,11 мм/об и скоростью вращения образца 400 об/мин. Затем на упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиуса $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм.

Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром 10 мм определялись экспериментально методом колец и полосок [13], а также методом удаления части цилиндрической поверхности [14]. Остаточные напряжения в гладких цилиндрических образцах диаметром 25 мм определялись методом колец и полосок [13]. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a гладких образцов представлено на рис. 2. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания при

одной и той же упрочняющей обработке в образцах диаметром 25 мм несколько больше, чем в образцах диаметром 10 мм. Это различие объясняется повышением жёсткости образцов с увеличением размеров их поперечного сечения. Аналогичные закономерности в распределении остаточных напряжений после гидродробеструйной обработки цилиндрических образцов из стали 45 и сплава Д16Т были установлены в работе [12] при изменении диаметра образцов от 10 мм до 50 мм.

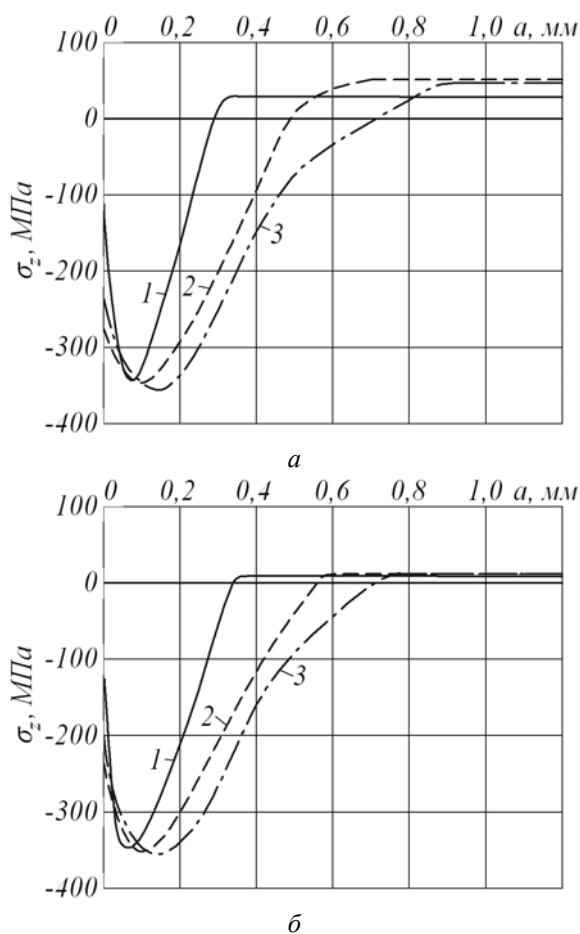


Рис. 2. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах из стали 20 диаметром 10 мм (а) и 25 мм (б): 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим методом по методике работы [11], так и численным методом по первоначальным деформациям с использованием программного комплекса MSC.Nastran /

MSC.Patran. Следует отметить, что результаты определения дополнительных остаточных напряжений двумя методами имели хорошее совпадение. Распределение осевых σ_z остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя a в наименьшем сечении образцов с надрезом $R = 0,3$ мм и $R = 0,5$ мм приведено на рис. 3, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов $\sigma_{ост}$ представлены в таблице. Обращает на себя внимание значительная величина сжимающих остаточных напряжений, достигающих на дне надреза $R = 0,3$ мм -908 МПа, что существенно выше не только предела текучести, но и предела прочности исследуемой стали 20. В работе [15] показано, что остаточные напряжения в упрочнённом (наклёпанном) слое могут превышать сопротивление разрыву S_k материала детали (образца) на 15%. В нашем случае этот предел не превышен, так как $S_k = 1416$ МПа.

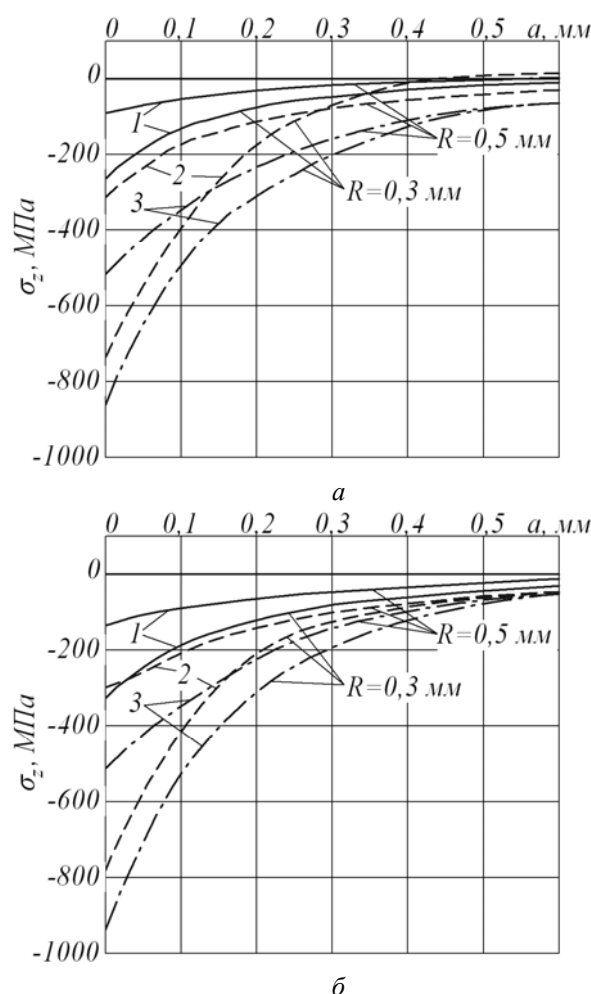


Рис. 3. Осевые остаточные напряжения σ_z в упрочнённых образцах из стали 20 диаметром 10 мм (а) и 25 мм (б) с надрезами после: 1 – ПДО; 2 – ОР, $P = 0,5$ кН; 3 – ОР, $P = 1,0$ кН

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов диаметром 10 мм в гладкой части проводились на машине МУИ-6000, диаметром 25 мм в гладкой части – на машине УММ-01 [16], база испытаний – $3 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости σ_{-1} представлены в таблице. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, глубина $t_{кр}$ которых для образцов диаметром 10 мм в среднем составляла 0,201 мм ($R = 0,3$ мм) и 0,197 ($R = 0,5$ мм), а для образцов диаметром 25 мм – 0,523 мм ($R = 0,3$ мм) и 0,525 ($R = 0,5$ мм), что соответствует зависимости глубины $t_{кр}$ от наименьшего размера поперечного сечения упрочнённой детали (образца), определяемой формулой (5).

Результаты испытаний образцов на усталость и определения остаточных напряжений

Диаметр образцов, мм	Радиус надреза R , мм	Неупрочнённые образцы σ_{-1} , МПа	Упрочнённые образцы					
			обработка	$\sigma_{ост}$, МПа	σ_{-1} , МПа	ψ_{σ}	$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
10	0,3	110	ПДО	-263	155	0,171	-126	0,357
			ОР, $P = 0,5$ кН	-732	230	0,164	-337	0,356
			ОР, $P = 1,0$ кН	-861	267,5	0,183	-454	0,347
	0,5	120	ПДО	-90	137,5	0,194	-48	0,365
			ОР, $P = 0,5$ кН	-311	187,5	0,217	-178	0,379
			ОР, $P = 1,0$ кН	-517	250	0,251	-333	0,390
25	0,3	107,5	ПДО	-343	137,5	0,087	-87	0,345
			ОР, $P = 0,5$ кН	-787	165	0,073	-171	0,336
			ОР, $P = 1,0$ кН	-908	175	0,074	-202	0,334
	0,5	112,5	ПДО	-142	130	0,123	-52	0,337
			ОР, $P = 0,5$ кН	-349	150	0,107	-111	0,338
			ОР, $P = 1,0$ кН	-515	172,5	0,117	-169	0,355

На рис. 4 представлена фотография излома одного из упрочнённых дробью образцов 10 мм с надрезом $R = 0,5$ мм, а на рис. 5 – диаметром 25 мм с надрезом $R = 0,5$ мм. На фотографиях чётко видны нераспространяющиеся трещины усталости 2, причём для образцов диаметром 10 мм нераспространяющаяся трещина имеет концентрическую форму (рис. 4), так как эти образцы испытывались на усталость при чистом изгибе с вращением. Для образцов диаметром 25 мм трещина имеет серповидную форму, так как испытания на усталость этих образцов проводились при поперечном изгибе в одной плоскости.

Из представленных в таблице данных видно, что опережающее поверхностное пластическое деформирование образцов с надрезом пневмодробеструйной обработкой и обкаткой роликом приводит к существенному повышению предела выносливости. Наиболее эффективна для исследованных образцов обкатка роликом, причём с увеличением усилия обкатки с $P = 0,5$ кН до $P = 1,0$ кН предел выносливости возрастает. Наблюдаемое явление объясняется большей глубиной залегания сжимающих остаточных напряжений в гладких упрочнённых образцах при увеличении усилия обкатки (рис. 2), результатом чего явилось повышение остаточных напряжений в образцах с надрезом.

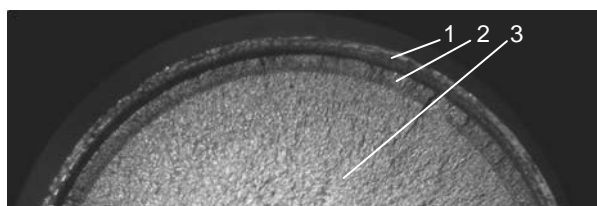


Рис. 4. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца из стали 20 диаметром 10 мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

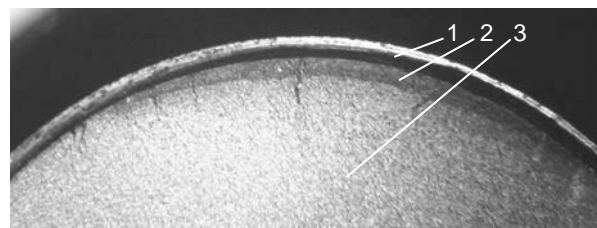


Рис. 5. Фрагмент излома упрочнённого дробью образца из стали 20 диаметром 25 мм с надрезом $R = 0,5$ мм: 1 – надрез, 2 – нераспространяющаяся трещина, 3 – зона долома

Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в условиях концентрации напряжений по первому критерию – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию коэффициента ψ_{σ} . Этот коэффициент в нашем исследовании изменяется в широких пределах: от 0,073 до 0,251 (см. таблицу), то есть изменяется почти в 3,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей.

Оценка влияния поверхностного упрочнения по второму критерию – среднеинтегральным остаточным напряжениям – приводит к существенно меньшему рассеянию соответствующего коэффициента $\bar{\psi}_{\sigma}$. Это объясняется тем, что критерий среднеинтегральных остаточ-

ных напряжений учитывает влияние на сопротивление усталости не только величины сжимающих остаточных напряжений, но и характера их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали (образца). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в проведённом исследовании изменяется от 0,334 до 0,390, составляя в среднем 0,353, и практически совпадает с значением $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, установленным в [12] для упрочнённых образцов и деталей с аналогичной концентрацией напряжений.

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$. Для определения приращения предела выносливости при изгибе следует воспользоваться формулой (4). Критерий $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ при этом вычисляется по зависимости (3) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине $t_{\text{кр}}$ нераспространяющейся трещины усталости и определяемой формулой (5). Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния упрочнения на предел выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений для упрочнённых деталей и образцов с надрезами можно принять равным 0,36.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов С. И., Павлов В. Ф.** Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность // Проблемы прочности. 1976. №5. С. 25–27.
2. **Кравченко Б. А., Митряев К. Ф.** Обработка и выносливость высокопрочных материалов. Куйбышев: Куйбышев. книж. изд-во, 1968. 131 с.
3. **Серенсен С. В., Борисов С. П., Бородин Н. А.** К вопросу об оценке сопротивления усталости поверхностно упрочнённых образцов с учётом кинетики остаточной напряжённости // Проблемы прочности. 1969. №2. С. 3–7.
4. **Туровский М. Л., Шифрин Н. М.** Концентрация напряжений в поверхностном слое цементированной стали // Вестник машиностроения. 1970. №11. С. 37–40.
5. **Иванов С. И., Павлов В. Ф.** Влияние остаточных напряжений на выносливость ненаклёпанного материала // Вопросы прикладной механики в авиационной технике. Куйбышев: КуАИ, 1973. Вып. 66. С. 70–73.
6. **Школьник Л. М., Девяткин В. П.** Повышение прочности шестерён дробеструйным наклёпом // Вестник машиностроения. 1950. №12. С. 7–12.
7. **Туровский М. Л., Новик Р. А.** Упрочняющая обкатка роликами азотированных стальных деталей // Вестник машиностроения. – 1970. – №1. – С. 39–42.

8. **Кудрявцев П. И.** Нераспространяющиеся усталостные трещины. М.: Машиностроение, 1982. 171 с.

9. **Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.** Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

10. **Павлов В. Ф.** О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений // Известия вузов. Машиностроение. 1986. №8. С. 29–32.

11. **Иванов С. И., Шатунов М. П., Павлов В. Ф.** Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып.1. С. 88–95.

12. **Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б.** Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008. 64 с.

13. **Иванов С. И.** К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок // Остаточные напряжения. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 48. С. 179–183.

14. **Иванов С. И., Григорьева И. В.** К определению остаточных напряжений в цилиндре методом снятия части поверхности // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1971. Вып. 48. С. 179–183.

15. **Радченко В. П., Павлов В. Ф.** К вопросу о наибольшей величине остаточных напряжений в упрочнённых деталях // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: мат. докладов МНТК 24–26 июня 2009 г. Ч.1. Самара: СГАУ, 2009. С. 251–252.

16. **Филатов Э. Я., Павловский В. Э.** Универсальный комплекс машин для испытания материалов и конструкций на усталость. Киев: Наукова Думка, 1985. 92 с.

ОБ АВТОРАХ

Павлов Валентин Фёдорович, д-р техн. наук, профессор, зав. каф. сопротивления материалов Самарского гос. аэрокосм. ун-та им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета) СГАУ, г. Самара. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

Вакулюк Владимир Степанович, канд. техн. наук, доцент той же каф. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

Чирков Алексей Викторович, ассистент той же каф. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.

Сазанов Вячеслав Петрович, начальник сектора прочности ЗАО Волжское конструкторское бюро РКК «Энергия» им. С. П. Королёва, г. Самара. Исследования в области механики деформируемых тел и конструкций.