

С.И.Иванов, В.Ф.Павлов

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА
ВЫНОСЛИВОСТЬ НЕНАКЛЕПАННОГО МАТЕРИАЛА

В современном машиностроении широко применяется упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием. В результате этой операции в поверхностном слое возникают наклёп и остаточные сжимающие напряжения. После поверхностного пластического деформирования наблюдается увеличение предела выносливости детали, особенно при наличии концентраторов напряжений.

Причиной упрочнения одни исследователи считают наклёп, другие — остаточные напряжения. Опыты, проведенные И.В.Кудрявцевым [1 — 3], позволяют предполагать, что роль остаточных напряжений являются решающей. Для создания остаточных напряжений в ненаклепанном материале в этих опытах на упрочненные образцы наносились надрезы. Глубина надреза превышала толщину наклепанного слоя, а поэтому на дне надреза находился ненаклепанный материал, испытывающий сжимающие напряжения, возникающие за счет перераспределения остаточных усилий гладкого образца.

Однако по результатам, полученным И.В.Кудрявцевым, окончательных заключений сделать нельзя, так как величина остаточных напряжений на дне надреза в указанных работах не определялась.

Цель настоящей работы - установить количественную связь между пределом выносливости ненаклепанного материала и величиной остаточных напряжений, восполнив таким образом указанный пробел.

Для создания остаточных напряжений в ненаклепанном материале использовался метод нанесения надреза полукруглой формы. Вызванные перераспределением дополнительные остаточные напряжения в наименьшем сечении образца вычислялись по формулам, полученным в работе [4]:

$$\sigma_{z\partial} = \sigma_{z\partial}(R, 0) \frac{R^2}{4\rho^2} (1 + 3 \frac{R^2}{\rho^2}); \quad \sigma_{\theta\partial} = \mu \sigma_{z\partial}, \quad (1)$$

где

$$\sigma_{z\partial}(R, 0) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} [1,273 \cos^2 \psi + 0,868 \psi \sin \psi - 0,118 \sin^2 \psi \sin 2\psi] \sigma_z(\psi) d\psi, \quad (2)$$

ρ - расстояние от цилиндрической поверхности образца до рассматриваемой точки;

R - радиус полукруглого надреза;

$\sigma_z(\psi)$ - осевое остаточное напряжение в гладком упрочненном образце.

При подстановке $\sigma_z(\psi)$ в формулу (2) следует учесть, что угловая координата ψ связана с глубиной соответствующего слоя гладкого образца a зависимостью $a = R \cos \psi$.

Для проведения усталостных испытаний применялись стандартные образцы из ст. 45, подвергнутые в течение трех часов отжигу при температуре 790°C (рис. 1). Отжиг производился

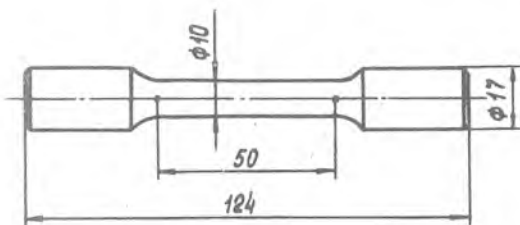


Рис. 1.

с целью снятия наклёпа, что необходимо для получения в дальнейшем остаточного напряженного состояния в ненаклепанном материале. Образцы для определения остаточных напряжений, возникающих после упрочняющей обработки, отличались несколько большей длиной.

Часть образцов после точения подвергалась гидродробе-струйной обработке. Глубина наклепанного слоя, найденная измерением микротвердости на косом шлифе, находилась в пределах от 0,22 мм до 0,25 мм. Степень упрочнения поверхности 126%. Эпюры остаточных напряжений, найденных методом снятия половины цилиндрической поверхности [5] , показаны на рис. 2.

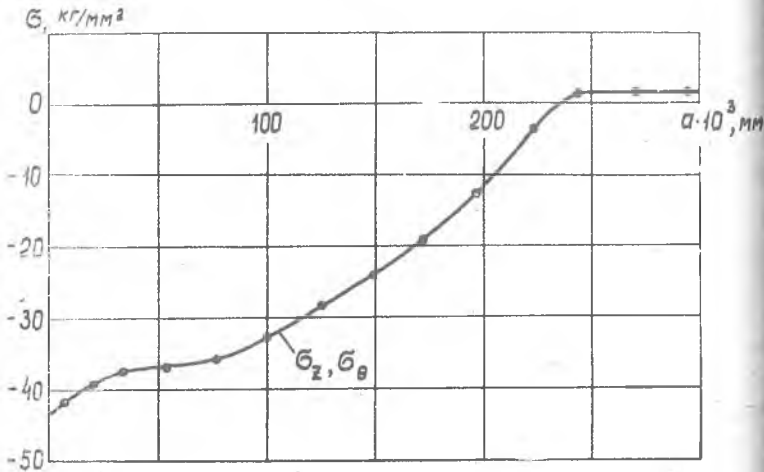


Рис. 2.

Результаты усталостных испытаний гладких образцов при симметричном цикле изгиба приведены в таблице I.

Таблица I

№	Серии образцов	σ_{-1} , кг/мм ²
1.	Гладкие, после точения и полирования шкуркой.	21,5
2.	Гладкие, после точения и электрополирования на глубину 50+60 мкм	20,5
3.	Гладкие, после точения и электрополирования на глубину 4-5 мкм.	21,5
4.	Гладкие, после точения и обдувки дробью.	23,5

Влияние электрополирования изучалось в связи с тем, что этот способ обработки применялся при изготовлении надреза. Снижение предела выносливости для второй серии образцов объясняется тем, что в них удалён слой с остаточными напряжениями сжатия, достигающими 30 кг/мм². Результаты усталостных испытаний третьей серии образцов свидетельствуют об отсутствии коррозионного эффекта от электрополирования. Аналогичный вывод имеется и в работе [1].

О степени упрочнения гладких образцов можно судить по результатам испытания четвертой серии. По сравнению с образцами, в которых наклёп и остаточные напряжения отсутствуют (вторая серия), наблюдается повышение предела выносливости на 15 %.

Далее испытывались образцы с полукруглым надрезом двух радиусов: 0,3 мм и 0,5 мм. Надрез выполнялся фасонным резцом и электрополированием на глубину 40-50 мкм. Электрополирование применялось для удаления слоя с наклёпом, образующимся после чистового точения [6]. Радиус надреза контролировался по шаблону с помощью микроскопа. Точность выполнения радиуса ± 15 мкм.

С каждым из указанных надрезов изготавливались две партии образцов. Гладкие образцы первой партии после точения обдувались дробью, образцы второй партии электрополировались на глубину 50-60 мкм для удаления наклёпанного слоя и,

следовательно, остаточных напряжений. После изготовления надреза в образцах первой партии на его дне в ненаклепанном материале действовали сжимающие остаточные напряжения, в образцах второй партии остаточные напряжения отсутствовали, так как их не было в исходных гладких образцах.

Остаточные напряжения образцов первой партии в области, прилегающей к дну надреза, подсчитывались по формулам (1), (2) с использованием эпюры остаточных напряжений, изображенной на рис. 2. Наибольшие значения осевого напряжения, действующего на дне надреза, приведены в таблице 2.

Таблица 2

№ п/п	Серии образцов	Упрочненные образцы		Неупрочненные образцы
		$\sigma_{\pm}^{\text{наиб.}}$, кг/мм ²	σ_{\pm} , кг/мм ²	σ_{\pm} , кг/мм ²
1.	R = 0,3 мм. Надрез электрополирован	-27,5	16,5	12
2.	R = 0,5 мм. Надрез электрополирован	-14,5	15	12,5
3.	R = 0,3 мм. Надрез не электрополирован	-	15,5	11,5

В этой же таблице содержится результаты усталостных испытаний на изгиб при симметричном цикле. Можно видеть, что наличие в наименьшем сечении образцов сжимающих остаточных напряжений приводит к повышению предела выносливости на 38% при $\sigma_{\pm}^{\text{наиб.}} = -27,5$ кг/мм² и на 20% при $\sigma_{\pm}^{\text{наиб.}} = -14,5$ кг/мм².

В таблице 2 приведены также пределы выносливости образцов с надрезом, который после точения не электрополировался. Здесь по сравнению с первой партией изменений практически не произошло, так как подача при изготовлении надреза была небольшой.

Зависимость между наибольшим остаточным напряжением и пределом выносливости можно считать линейной:

$$\sigma_{\pm} = \sigma_{\pm}^{\circ} - \psi \sigma_{\pm}^{\text{наиб.}}, \quad \text{где } \psi = 0,17. \quad (3)$$

*) Вычислено по формуле номинального напряжения с использованием W нетто.

В формуле (3) не учитывается второй компонент остаточного напряженного состояния $\sigma_{\theta}^{\text{НАИВ.}} = \mu \sigma_{\Sigma}^{\text{НАИВ.}}$, роль которого невелика. Например, в соответствии с теорией наибольших касательных напряжений $\sigma_{\theta}^{\text{НАИВ.}}$ вообще не должно влиять на предел выносливости.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии остаточных напряжений на усталостную прочность деталей с концентраторами напряжений. Они также указывают на целесообразность упрочнения деталей методами поверхностного пластического деформирования до изготовления резьбы или других концентраторов, непосредственное упрочнение которых затруднено.

Л и т е р а т у р а

1. Кудрявцев И.В., Саверин М.М., Рябченков А.В. Методы поверхностного упрочнения деталей машин. М., Машгиз, 1949.
2. Кудрявцев И.В. Исследование влияния концентраторов напряжений на усталостную прочность наклепанной стали. Сб. трудов ЦНИИТМАШ, кн. 43, М., Машгиз, 1951.
3. Кудрявцев И.В., Розенман Л.М. "Металловедение и термическая обработка металлов", 1961, № 3.
4. Иванов С.И., Шатунов М.П., Павлов В.Ф. Труды КуАИ, вып.60, 1973.
5. Иванов С.И., Григорьева И.В. Труды КуАИ, вып. 48, 1971.
6. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. М., Машгиз, 1956.