

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ТЕКСТИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### TECHNOLOGY OF IMPROVING PERFORMANCE OF MULTISTAGE SHAFT TEXTILE EQUIPMENT

*В.А.ШОРИН, О.Ф.ПШЕНИЧНЫЙ*  
*V.A.SHORIN, O.F. PSHENICHNY*

(Пензенский государственный университет)  
(Penza State University)  
E-mail: penzgu.tmt@inbox.ru

*В статье описывается оптимизация технологии изготовления валов текстильных машин. Приведены результаты микроскопических исследований и испытаний на усталостную прочность. Предлагается математическая модель долговечности.*

*Article describes the technology of the manufacture of multistage shaft textile equipment, that improves their performance. This technology is based on results of theoretical and experimental studies. Mathematical model of longevity described.*

**Ключевые слова:** многоступенчатые валы текстильного оборудования, усталостная прочность, долговечность, математическая модель.

**Keywords:** multistage shafts textile equipment, fatigue strength, durability, mathematical model.

Промышленные испытания текстильного оборудования показали, что около 30% отказов по количеству и 60% по времени простоя приходится на многоступенчатые валы, соединенные в линию. Одной из причин отказов многоступенчатых валов являются усталостные изломы, возникновение которых связано со знакопеременными циклическими нагрузками в областях концентрации напряжений и деформаций, резкого изменения формы и размера. Также значительное влияние на усталостное разрушение оказывают характеристики рабочих поверхностей валов [1]. Замена вышедших из строя линий валов связана с демонтажем самих валов, а также сопрягаемых узлов и деталей, с полной или частичной потерей работоспособности оборудования. На основании информации о технологиях изготовления многоступенчатых валов выбраны девять вариантов упрочняющих технологий (табл. 1 – варианты для сравнительных испытаний), по которым изготовлены опытные образцы из стали 45.

Применение цифровой электронной микроскопии в изучении процесса усталостного разрушения образцов позволило экспериментально установить специфику формирования усталостных повреждений в металле при циклическом нагружении, а анализ дефектов кристаллической решетки при усталости дает ответ о природе усталости металлов.

На примере фрактографии излома серии 6, ( $\sigma = 600$  МПа,  $N = 2,2 \cdot 10^6$  циклов) показаны основные зоны усталостного разрушения образцов серий 2, 4, 5, 6, 7 и 9 (рис. 1), упрочненных ППД.

Зона  $l_s$  – чистое усталостное разрушение, характеризующееся наличием усталостных микрополос, наблюдаемых при электронной микроскопии. В случае образцов, упрочненных ППД, зона  $l_s$  состоит из двух областей:  $l_{s1}$  и  $l_{s2}$ .  $l_{s1}$  – усталостная трещина распространяется в материале с исходной структурой;  $l_{s2}$  – трещина распространяется в поверхностно-упрочненном материале.

Т а б л и ц а 1

Варианты испытаний	Вид упрочняющей технологической обработки	d образ раз-ца, мм	Глубина упрочненного слоя, мм	Предел выносливости, $\sigma_{-1}$ , МПа	Эффективный коэффициент (к серии 4)
Серия 1	Состояние поставки, отжиг 750°C – 6ч	7,5	-	350	0,64
Серия 2	Состояние поставки, обкатка роликами (ППД)	7,5	0,66...0,86	510	0,95
Серия 3	Состояние поставки, ППД, ТВЧ	7,5	0,65...0,80	340	0,63
Серия 4	Состояние поставки, ППД, отпуск, 200 °С – 2 ч	7,5	1,0...1,2	540	1,0
Серия 5	Состояние поставки, ППД, отпуск, 500 °С – 6 ч, ТВЧ	7,5	1,0	560	1,06
Серия 6	Состояние поставки, ППД, отпуск, 300 °С – 2 ч, ТВЧ	7,5	0,8...1,1	540	1,0
Серия 7	Состояние поставки, ППД, ТВЧ, отпуск, 200 °С – 2 ч, правка	10	1,0...1,2	520	0,96
Серия 8	Состояние поставки, ППД, ТВЧ, отпуск, 200°C – 2 ч, правка, отпуск, 300°C – 1ч	10	0,75...0,95	455	0,84
Серия 9	Состояние поставки, ППД, отпуск, 200 °С – 2 ч, ТВЧ, отпуск, 200 °С – 2 ч	10	0,7...0,8	500	0,93

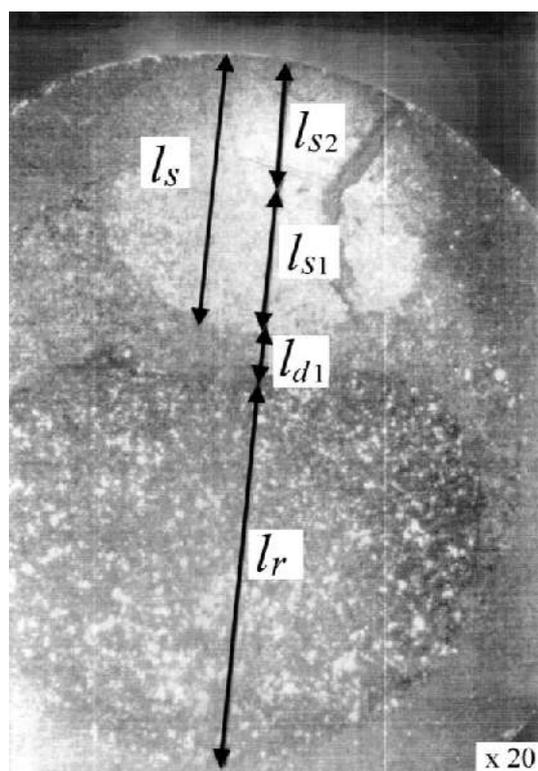


Рис. 1

Усталостное разрушение вызвано изменениями кристаллической решетки металла вследствие циклических нагружений, которые он испытывает. С первых циклов деформации на поверхности образ-

ца под оптическим микроскопом наблюдаются полосы скольжения в различных зернах металла. При продолжении циклической деформации можно наблюдать увеличение числа этих полос, распределение которых всегда сильно различается для разных зерен, и в особенности в усилении этих полос, что приводит к появлению так называемых “стойких полос”, которые нельзя устранить ни полированием, ни отжигом. Следовательно, металл подвергается необратимому повреждению. При сильном увеличении в этом случае обнаруживают наличие микротрещин.

Зона  $l_{d1}$  характеризуется межзеренным разрушением, которая по мере распространения трещины переходит в вязкое, а затем в хрупкое разрушение [2].

Поверхностное упрочнение не только увеличивает сопротивление сталей возникновению усталостной трещины, но и повышает сопротивление распространению трещины. Этот вывод справедлив для случая поверхностно-упрочненных образцов, у которых зарождение усталостной трещины происходит на границе раздела упрочненного слоя и основной массы металла. В этом случае до прорыва поверхностного слоя имеются условия для рас-

пространения трещины в условиях плоской деформации. Большая толщина упрочненного слоя влияет на общее напряженное состояние материала и напряженное состояние впереди распространяющейся усталостной трещины.

Как видно из рис. 1, в упрочненных ППД (обкаткой роликами) образцах (за исключением серии 9) усталостная трещина, зародившаяся на границе раздела упрочненного слоя и исходного металла, распространяется в условиях плоской деформации, как в глубь металла, так и в направлении его поверхности. Распространение трещины в условиях плоской деформации совпадает с выходом усталостной трещины на поверхность металла и началом ускоренного распространения трещины в условиях плосконапряженного состояния (зона  $l_{d1}$ ). Окончательное разрушение образца происходит в зоне  $l_r$ .

Размер зоны  $l_s$  у образцов с упрочненным поверхностным слоем имеет тенденцию возрастать по сравнению с зоной  $l_s$  у исходного материала (серия 1).

Для экспериментов взяты ступенчатые валы, наиболее массово встречающиеся в производстве текстильного оборудования и претерпевшие в процессе формообразования механическое, тепловое воздействие, а также имеющие большое количество концентраторов напряжения (табл. 2 – варианты рассматриваемых технологий изготовления валов) [3].

Выделены факторы, оказывающие влияние на величину коробления и циклическую долговечность – температуру нагрева и время старения ( $X_1 = 300, 400, 500$  °С;  $X_2 = 2, 4, 6$  ч).

При проведении экспериментов использовался метод центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка.

В качестве параметров оптимизации выбраны два показателя:  $Y_1$  – величина коробления, мм;  $Y_2$  – малоциклическая долговечность ( $N \cdot 10^5$  тыс. циклов) при напряжении 450 МПа и частоте нагружения 1500 циклов в минуту.

Т а б л и ц а 2

№	Наименование операции	Наименование валов		
		мотальный	плющильный	рифленый цилиндр
1	Заготовительная операция	+	+	+
2	Правка заготовки	+	+	+
3	Обкатка роликами			+
*	Отпуск	+	+	+
4	Шлифование черновое	+	+	
*	Отпуск	+	+	+
5	Правка после операции обкатка роликами и шлифования	+		
6	Токарная (черновая обработка хвостовика)	+	+	+
7	Токарная операция	+	+	+
8	Токарная операция	+	+	+
9	Токарная обработка участка для лысок			+
10	Накатка рифлей			+
*	Отпуск			+
11	Фрезерование лысок под ключ	+	+	+
12	Термическая операция (ТВЧ)	+	+	+
*	Отпуск	+	+	+
13	Правка после ТВЧ	+	+	+
14	Шлифование центрирующей поверхности и под подшипник	+	+	+
15	Токарная операция (подрезка торцев)	+	+	+
16	Шлифование чистовое	+	+	+
*	Отпуск	+	+	+
17	Полировочная		+	
18	Правка окончательная	+	+	+
19	Контрольная операция	+	+	+

На первом этапе находим зависимость величины коробления  $Y_1$  (имеются средние значения из 3-х измерений коробления валов) от исследуемых факторов.

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_1X_2 + A_4(X_1)^2 + A_5(X_2)^2 + A_6(X_1)^2X_2 + A_7X_1X_2^2 + A_8X_1^2X_2. \quad (1)$$

Количество сочетаний факторов  $i = 27$  ( $i = 0 \dots 26$ ).

$$Y_1 = 0,226 + 2,5 \cdot 10^{-3}X_1 - 0,013X_2 + 2,25 \cdot 10^{-3}X_1X_2 - 0,04X_1^2 - 0,031X_2^2 + 0,012X_1^2X_2 - 8,75 \cdot 10^{-3}X_1X_2^2 + 0,052X_1^2X_2^2. \quad (2)$$

Температурное старение после операции ППД при указанных режимах на нижнем уровне дает снижение коробления при закалке нагревом поверхности ТВЧ с 0,356 до 0,182 мм.

Как показал однофакторный эксперимент, дальнейшее снижение температуры и времени старения нерационально из-за

$$Y_2 = 8,667 - 3,833X_1 - 2,167X_2 + 3,333X_1X_2 - 1,833X_1^2 - 2,167X_1^2X_2 + 3,5X_1^2X_2^2. \quad (3)$$

Зависимость (3) показывает, что для увеличения циклической долговечности ( $Y_2$ ) валов значение факторов следует установить на нижнем уровне ( $X_1 = 300^\circ\text{C}$ ;  $X_2 = 2$  ч), это соответствует варианту ППД серий 4 и 6 (табл. 1).

## ВЫВОДЫ

На основе экспериментальных исследований стандартных образцов из стали 45 выбран вариант поверхностного упрочнения, обеспечивающий предел выносливости:  $\sigma_{-1} = 540$  МПа, состояние поставки, ППД (обкатка роликами), отпуск  $200^\circ\text{C}^\circ - 2$  ч, закалка ТВЧ, отпуск  $200^\circ\text{C} - 2$  ч.

Число уровней ( $u = 3$ ); факторов ( $k = 2$ ); параллельных экспериментов ( $m = 3$ ).

Необходимое число экспериментов:  $N = u^k$ ;  $N = 9$ . Находим математическую модель в виде:

Окончательное уравнение регрессии зависимости коробления  $Y_1$  от факторов имеет вид:

отсутствия положительного влияния на процесс снижения коробления.

На втором этапе находим зависимость величины циклической долговечности  $Y_2$  от температуры и времени старения. Окончательное уравнение регрессии имеет вид:

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смогунов В.В., Ардеев А.В., Кузьмин А.В. Математическая модель съема металла заготовок из стали в процессе доводки // *Сталь*. – 2013, №10.
2. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1976.
3. Денисова Н.Е., Шорин В.А. Повышение сопротивления усталости валов малой жесткости конструктивно-технологическими методами // Сб. матер. III Всерос. науч.-практ. конф.: 'Современные технологии в машиностроении. – 2000', Часть П.- Пенза, 2000.
4. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977.

Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики. Поступила 10.01.14.