

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВТОРИЧНЫХ ВАЛОВ ПОДВЕРГАЕМЫХ РЕНОВАЦИИ ИЗНОШЕННОГО СЛОЯ

Сидашенко А.И., Скобло Т.С., Власовец В.М., Ридный Р.В.,  
Гончаренко А.А.  
(ХНТУСГ)

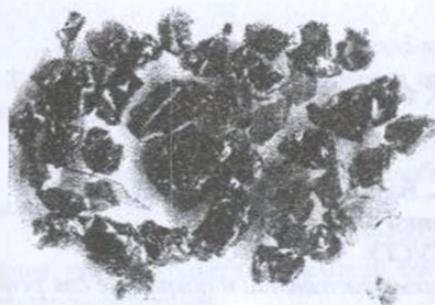
*Представлена методика расчета шлицевых соединений и покрытие для реновации изношенного слоя вторичных валов, нанесенное под слоем флюса с микролегированием. Предложены пути уменьшения уровня напряженно-деформированного состояния.*

Основная причина эксплуатационных отказов вторичных валов 150.37.125-2 коробки передач 150.37.037-2 трактора Т-150 – износ различной интенсивности рабочей поверхности. Причем наиболее изнашиваемой является, как правило, одна сторона шлица. Наиболее распространенными приёмами реновации изношенного слоя таких валов являются наплавка под слоем флюса вдоль и поперек шлица (по винтовой линии).

В настоящее время отсутствует единая точка зрения по наиболее эффективному технологическому приему нанесения покрытия при реновации изношенного слоя шлицевых валов. Кроме того, не ясно как проводить процесс наплавки, чтобы обеспечить минимальный уровень напряжений, уменьшить склонность к повреждаемости и по возможности максимально сохранить исходные свойства сердцевины вала. Поэтому целью настоящей работы является определение напряженно-деформированного состояния по уровню  $H_c$  новых и валов после эксплуатации, а также разработка методики расчета шлицевого соединения.

Объектом исследования был вторичный вал 150.37.125-2 коробки передач 150.37.037-2 трактора Т-150, изготовленный из стали 45 содержащий 0,44% С; 0,15% Cr; 0,52% Mn; 0,32% Si; 0,1% Ni. В качестве покрытия использовали низкоуглеродистую, низколегированную наплавочную проволоку Нп-30ХГСА Ø1,6 мм, содержащую 0,31% С; 0,95% Cr; 1,1% Mn; 0,98% Si; 0,12% Ni; до 0,04% S; до 0,04% P. Покрытие наносили под слоем плавленого флюса АН-348А, содержащего (рис. 1, а): 41-44% SiO<sub>2</sub>; 34-38% MnO; до 6,5% CaO; 5,0-7,5% MgO; до 4,5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; до 2,0% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; до 4,0-5,5% CaF<sub>2</sub>; до 0,15% S; до 0,12% P. Микролегирование наплавленного слоя осуществляли добавлением в стандартный флюс зольных отходов Змиевской ГРЭС (см.рис.1, б). Химический состав зольных отходов: 19,3-20,0% Fe; 12,7-14,2% Al; 1,92,0% Mg; 0,6-1,0% Cu; 0,45-0,6% Mn; 0,12-0,15% Cr; 1,2-1,5% Ti; 1,2-1,7% V; 3,9-4,4% Ce; 0,02-0,04% S; 0,02-0,03% P; остальное Si.

Для нанесения покрытия использовали установку УД-209 (рис. 2, а), а оценку напряженно-деформированного состояния – по коэрцитивной силе, прибор КРМ-Ц-2К (см. рис. 2,б).

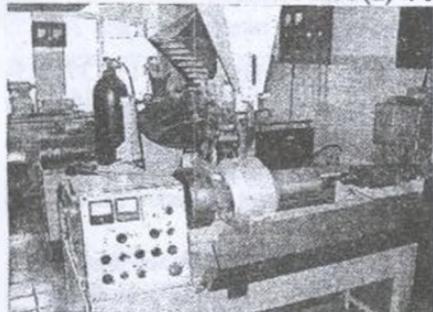


а)



б)

Рис. 1. Флюс АН-348А (а) и зольные отходы Змиевской ГРЭС (б),  $\times 60$



а)



б)

Рис. 2. Установка для нанесения покрытия под слоем флюса – УД-209 (а) и коэрцитиметр КРМ-Ц-2К (б)

Традиционно расчет шлицевых соединений осуществляется на смятие по среднему давлению [1]. Такой расчет является условным и не отражает ряда конструктивных факторов: диаметра и длины втулки, диаметра вала, длины шлицев, величины зазоров, погрешностей изготовления. Не учитывается также радиальная сила, которая в ряде случаев вызывает добавочные давления, больше, чем основные от крутящего момента.

В общем случае нагрузка распределяется неравномерно между отдельными боковыми поверхностями шлицев и участками цилиндрической поверхности. Доля нагрузки зависит от вида нагружения (соотношение  $P$  и  $M_x$ ) и величины зазоров по центрирующему диаметру и боковым поверхностям.

Чем больше  $P_{\text{сум}}/M_x$ , тем неравномернее распределяется нагрузка между боковыми поверхностями отдельных шлицев. Если величина  $P_{\text{сум}}/M_x > 0,5$ , то в работе одновременно принимают участие не все боковые поверхности шлицев; при этом нагрузка на каждую рабочую поверхность возрастает. Количество участвующих в восприятии нагрузки участков центрирующей цилиндрической поверхности зависит в основном от величины зазора  $\Delta d$  по центрирующему диаметру. При нулевом зазоре одновременно работают участки цилиндрической поверхности, расположенные на полуокружности. С увеличением зазора количество работающих участков цилиндрической поверхности уменьшается, а при относительно

больших зазорах она не воспринимает нагрузку. При расчете приняли, что работают только боковые грани.

За один оборот нагрузка  $P_\beta$  на боковую поверхность шлица изменяется по синусоидальному закону в зависимости от угла его расположения:

$$P_\beta = P_{cp}(u + \omega \sin \beta) \quad (1)$$

Наибольшая и наименьшая нагрузки:

$$P_{\beta \max} = P_{cp}(u + \omega); P_{\beta \min} = P_{cp}(u - \omega), \quad (2)$$

где  $P_{cp} = \frac{M_z}{r_{\text{ш}} z}$  – средняя номинальная нагрузка на одну боковую поверхность, а  $u = \frac{8 - a_1 \omega}{z_p}$ .

Значения  $u$  и  $\omega$  для восьмишлицевого соединения:

$$\omega = \frac{8(z_p \varepsilon - a_1) + a_2 \gamma \xi}{a_1 - a_1^2 + a_2 \gamma} \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \frac{P \cdot r_{\text{ш}}}{M_z} = \frac{d_{cp}}{D_m \cos \alpha_0}$  – безразмерный показатель, зависит, в основном, от соотношения диаметра вала и шлицев втулки;  $d_{cp}$  – средний диаметр шлицев, мм;  $D_m$  – диаметр начальной окружности шлицев, мм;  $\alpha_0$  – угол зацепления;  $\xi = \frac{\Delta}{K \sigma_{cp}}$  – отношение величины радиального зазора к величине средне-

го упругого перемещения  $\delta_{cp} = K \sigma_{cp}$ ;  $\Delta$  – радиальный зазор по центрирующему диаметру ( $\Delta = 0,5 \Delta d$ ), мкм;  $\sigma_{cp}$  – среднее давление в соединении, МПа;  $K$  – коэффициент контактной податливости (при ориентировочных расчетах без учета концентрации нагрузки выбирали  $K = 0,1-0,4$  (меньшие значения – при малой длине втулки  $l/d = 1-1,5$  и высоких средних значениях  $\sigma_{cp} = 10-20$  МПа; большие значения – при большой длине соединения  $l/d = 2,5-3,5$  и низких давлениях  $\sigma_{cp} = 2-5$  МПа));  $\gamma = \frac{F_1 K}{FK_1}$  – отношение податливости шлица в тангенциальном

направлении к податливости в радиальном;  $F_1 = b l$  – площадь контакта по цилиндрической поверхности одного выступа; при центрировании по наружному диаметру  $b$  – толщина шлицев вала, при центрировании по внутреннему диаметру – толщина шлицев втулки;  $F = h l$  – площадь контакта одной пары шлицев;  $K_1$  – коэффициент собственной упругой деформации шлицев (многократно меньше  $K$  и принимали равным 0,004). Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Установлено, что показания  $H_c$ , измеренной на шлицах новых валов, изготовленных из стали 45 находятся в пределах 10 – 12 А/см а после эксплуатации составляет 13,5 – 14,5 А/см, что объясняется формированием остаточных напряжений [2].

Таблица 1 Исходные данные и результаты расчета шлицевого соединения вторичного вала 150.37.125-2 коробки передач 150.37.037-2 на смятие по наибольшему давлению

Наименование	Обозначение	Показатель
Шестерня, число зубьев	$z_1$	23
Крутящий момент, Н·м	$M_c$	5630
Длина шлицев, мм	$l$	64
Наружный диаметр, мм	$D$	$65_{-0,3}^{-0,1}$
Ширина шлица, мм	$b$	$10_{-0,012}^{-0,06}$
Внутренний диаметр, мм	$d$	$56_{-0,105}^{-0,065}$
Число шлицев	$z$	8
Средний радиус соединения, мм	$r_{\text{шл}}$	30,25
Рабочая высота шлица, мм	$h$	3,5
Фаска, мм	$f_1$	0,5
Площадь контакта одной пары шлицев, мм <sup>2</sup>	$F$	$2,24 \times 10^{-2}$
Среднее давление, МПа	$\sigma_{\text{ср}}$	13,57
Коэффициент неравномерности	$\psi$	0,75
Сила в зацеплении, Н	$P$	104,2
Коэффициенты	$\epsilon$	0,56
	$\xi$	12,2
	$\gamma$	44
	$\omega$	1,168
	$\mu$	0,976
Коэффициент контактной податливости боковой поверхности	$K$	0,045
Коэффициент собственной упругой деформации зубьев	$K'_1$	0,004
Средняя нагрузка на боковую грань, кН	$P_{\text{ср}}$	2,33
Наибольшая нагрузка, кН	$P_{\text{max}}$	5
Давление на наиболее нагруженной грани, МПа	$\sigma_1$	21,85
Погрешность шага, мкм	$\Delta \tau$	6
Комплексный параметр	$\frac{\Delta_s}{K \sigma_{\text{т}}}$	0,6
	$K_1$	0,6
Коэффициенты, учитывающие погрешность шага	$e/l$	0,219
	$l/D$	0,985
	$K'_2$	2,5
Коэффициент концентрации учитывающий эксцентриситет	$K'_2$	2,5
Коэффициент концентрации учитывающий закручивание вала	$K'_2$	1,5
Коэффициент продольной концентрации нагрузки	$K_2$	3,0
Коэффициент по высоте шлица	$K_3$	2,15
Окружной зазор, мкм	$\Delta_0$	220
Наибольшее давление, МПа	$\sigma_{\text{с, max}}$	234,9
Допускаемое напряжение, МПа	$[\sigma_{\text{сМ}}]$	450

Использование различных технологических приемов наплавки под слоем флюса АН-348 проволокой Нп-30ХГСА обеспечивают следующие показания  $H_c$ : вдоль шлица – 23-27 А/см; по винтовой линии – 21,8-22,4А/см.

Сопоставительные исследования выявили, что наплавка по винтовой линии является более приемлемой с технологической точки зрения (уменьшается время и количество переходов), так и с точки зрения формирования напряжений при близкой структуре металла (в среднем на 10%). Учитывая малую толщину покрытия, оценку его прочности определяли по методике Гуляева-Гудцова [3]. Сущность данной методики заключалась в том, что измерялась длина диагонали отпечатка, нанесенного алмазным индентором (прибор ПМТ-3). При этом для расчетов использовалась формула:

$$\sigma_n = 2P/d^2 \quad (4)$$

где  $P$  - нагрузка на индентор, г;  $d$  - длина диагонали отпечатка, мм

Прочность покрытия нанесенного проволокой НП-30ХГСА под слоем флюса составила 362 МПа. Для повышения твердости покрытий исследовали варианты наплавки с микролегированием зольными отходами в пределах 5-20%. В результате при введении 5%-ной зольной добавки обеспечено максимальное повышение прочности на 47%. Дальнейшее увеличение доли добавки снижает прочность металла покрытия до 289 МПа за счет формирования повышенного количества пор и неметаллических включений, преимущественно сложных окисных.

Для наплавки под слоем флюса вдоль шлица прочность покрытия с 5%-ной добавкой зольных отходов составила 503-525 МПа, а по винтовой линии 463-503 МПа. Учитывая, что согласно расчетам допустимое напряжение составляет 450 МПа, то предложенное покрытие с дополнительным микролегированием обеспечивает необходимый уровень прочности для эксплуатации.

Установлено [4], что при наплавке под слоем флюса наиболее рационально осуществлять процесс в один проход, обеспечив при этом максимальную твердость. Однако при ускоренном охлаждении формируется повышенный уровень напряжений, существенно зависящий от толщины покрытия и который может быть спрогнозирован по экспериментально установленной нами зависимости:

$$H_c = 8,27 + 0,3h \quad (5)$$

Метод наплавки по винтовой линии позволяет реализовать приём, который может обеспечить дополнительное снижение напряжений путем создания программированных полостей для релаксации термических напряжений [5]. В соответствии с этим для управления уровнем напряжений при наплавке вдоль шлица и по винтовой линии изменением технологических режимов процесса, необходимо решить задачу нестационарного теплообмена с учетом фазовых переходов и деформаций в пластической области. Кроме того, для регулирования технологическим процессом необходимо оценить уровень напряженно-деформированного состояния в эксплуатации, а также выполнить расчет формирующихся остаточных напряжений после остывания покрытия.

### Список литературы

1. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн.. Кн.2. [под ред. П.Н.Учаева]. - 3-е изд., исправл. - М.: Машиностроение, 1988. - 544 с.

2. Неруйнівний контроль якості магнітним методом деталей сільськогос-

подарських машин при технічному обслуговуванні та ремонті: СОУ 29.32.4-37-532:2006. - [Чинний від 2008-03-01]/[Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Власовець В.М. та ін.]. - К.: Держспоживстандарт України, 2007. - с.27. - (Галузевий стандарт України).

3. Гуляев А.П. *Металловедение* / Гуляев А.П. – М.: Металлургия, 1977. – 648 с.

4. Шехтер С.Я. *Наплавка металлов* / С.Я.Шехтер, В.Д.Резницкий. – М.: Машиностроение, 1982. -71 с.

5. Патент 33102 України “Способ восстановления деталей”, / [Аветисян В.К., Власовець В.М., Гончаренко А.А., Полетов В.А., Сайчук А.В., Скобло Т.С., Харьяков А.В.], № u200801533; заявл. 06.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. №11.

### Анотація

**Методика розрахунку шліцьових з'єднань вторинних валів, що підлягають реновації зношеного шару**

*Представлено методику розрахунку шліцьових з'єднань та покриття для реновації зношеного шару валів, що наноситься під шаром флюсу з мікролегуванням. Запропоновано шляхи зменшення рівня напружено-деформованого стану.*

### Abstract

**Method of calculation of castle-type connections of billows, that renovation of threadbare layer is subject**

*The method of calculation of castle-type connections and coverage is presented for renovation of threadbare layer of billows, which is inflicted under the layer of gumbol with a microalloying. The ways of diminishing of level are offered tensely deformed to the state.*