

## ВОЛНОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Кисляков В.В.

Озёрский технологический институт МИФИ, г. Озёрск

В машиностроении широко применяются зубчатые соединения – шлицевые, эвольвентные и треугольные. Каждое из них имеет свои различные достоинства и недостатки [1]. Общий недостаток – концентрация напряжений из-за резкого изменения формы и размеров по сечению и, как следствие, снижение прочности соединения. Поэтому предлагается для соединения типа вал-втулка волновой «радиусный» профиль рабочих поверхностей, образованный сопряженными дугами окружностей. Дуги окружностей образуют одинаковые по высоте выступы и впадины относительно делительной окружности радиуса  $r$  (рис.1). Радиусы выступов  $R_1$  и впадин  $R_2$  определяется из треугольников  $OAB$  и  $OAC$  по теореме косинусов.

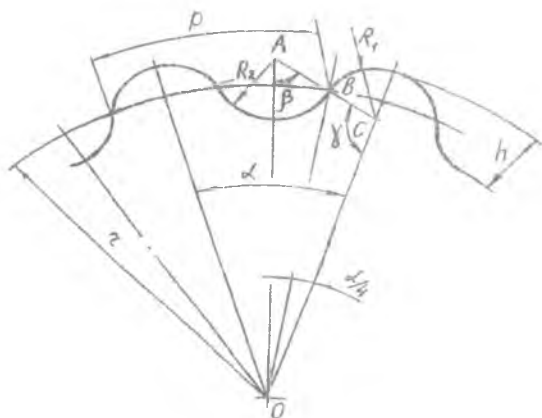


Рис. 1

$$R_1 = \frac{r^2 + 0,5hr + 0,125h^2 - r(\cos \alpha/4)(r + 0,5h)}{r + 0,5h - r(\cos \alpha/4)}$$

$$R_2 = \frac{r^2 - 0,5hr + 0,125h^2 - r(\cos \alpha/4)(r - 0,5h)}{r(\cos \alpha/4) - r + 0,5h}$$

где  $h$  – высота зуба (профиля),

$\alpha$  – угловой шаг,

$$\alpha = \frac{2\pi}{z},$$

где  $z$  – шаг зубьев по делительной окружности.

Плавная форма выступов и впадин, незначительное различие в радиусах  $R_1$  и  $R_2$  позволяют добиться более равномерного распределения напряжений на рабочих поверхностях. Выполнить волновой «радиусный» профиль можно производительным методом обкатки для поверхностей большого радиуса и протягиванием – для отверстий малого радиуса  $r$  [2]. Известно, что протяжки с технологически отработанным профилем эвольвентных шлицев существенно дороже протяжек с прямоочными шлицами. У этих протяжек возможна замена эвольвентного профиля дугами окружностей при отсутствии приспособления для правки шлифовального круга по эвольвентному профилю [3]. То есть предлагаемый профиль для обработки отверстий протяжками может быть более технологичным, чем эвольвентный.

Рассмотрим расчет на прочность волнового соединения. Допускаем, что напряжения распределены на рабочих поверхностях равномерно.

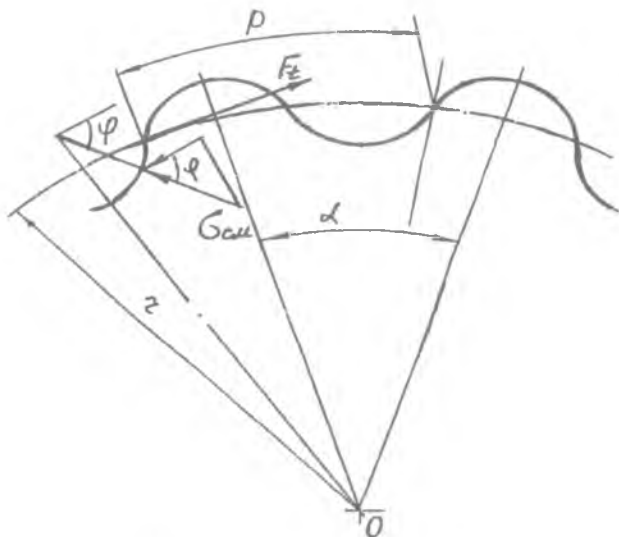


Рис.2

Расчетная схема представлена на рис.2, в соответствии с которой окружная сила  $F_t$ , передаваемая одним зубом, может быть определена из

условия прочности по напряжениям смятия

$$F_i = l \left\{ \int_{\frac{\pi}{2}-\beta}^{\frac{\pi}{2}} [\sigma_{см}] \cdot R_2 \cos\left(\varphi - \frac{\alpha}{4}\right) d\varphi + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} [\sigma_{см}] \cdot R_1 \cos\left(\varphi + \frac{\alpha}{4}\right) d\varphi \right\}$$

или

$$F_i = 2l[\sigma_{см}] \cdot \left[ R_1 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi + \gamma \cdot z}{2z}\right) + R_2 \sin\frac{\beta}{2} \sin\left(\frac{\beta \cdot z - \pi}{2z}\right) \right],$$

где  $l$  — длина соединения,

$[\sigma_{см}]$  — допускаемые напряжения смятия.

Углы  $\beta$  и  $\gamma$  можно определить из теоремы синусов.

В треугольнике OAC

$$AO = r - 0,5h + R_2,$$

$$CO = r + 0,5h - R_1,$$

$$AC = R_1 + R_2,$$

$$\frac{r + 0,5h - R_1}{\sin \beta} = \frac{r - 0,5h + R_2}{\sin \gamma} = \frac{R_1 + R_2}{\sin \pi / z},$$

$$\sin \beta = \frac{r + 0,5h - R_1}{R_1 + R_2} \sin \pi / z,$$

$$\sin \gamma = \frac{r - 0,5h + R_2}{R_1 + R_2} \sin \pi / z.$$

Крутящий момент, передаваемый соединением, имеющим  $z$  зубьев, будет

$$T = 2r \cdot z \cdot l[\sigma_{см}] \cdot \left[ R_1 \cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi + \gamma \cdot z}{2z}\right) + R_2 \sin\frac{\beta}{2} \cdot \sin\left(\frac{\beta \cdot z - \pi}{2z}\right) \right]$$

Наибольшая высота профиля зубьев будет при  $R_1 = R_2 = R$  (рис.3). То есть при одинаковых по форме и размерам выступов и впадин зубьев. В этом случае

$$R = r \cdot \sin \frac{2\pi}{z},$$

$$h = 2r \cdot \sin \frac{2\pi}{z}.$$

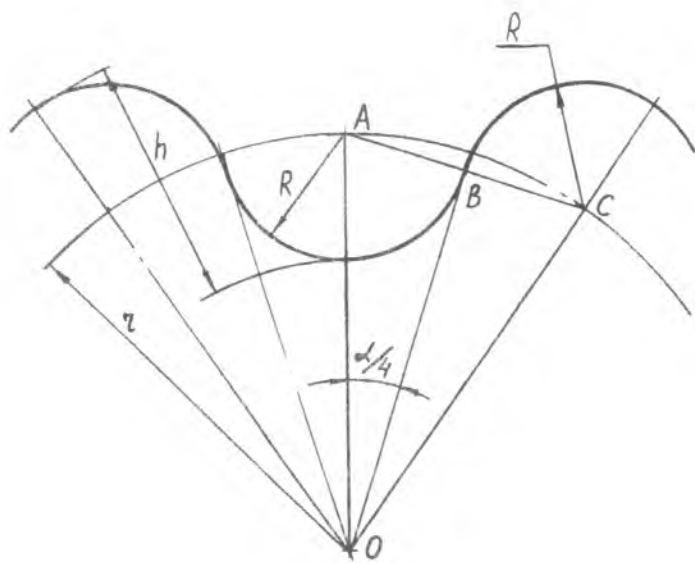


Рис.3

$$T = 2r^2 \cdot z \cdot l \cdot [\sigma_{cm}] \sin \frac{2\pi}{z} \left[ \cos \left( \frac{\gamma}{2} \right) \cos \left( \frac{\pi + \gamma \cdot z}{2z} \right) + \sin \frac{\beta}{2} \cdot \sin \left( \frac{\beta \cdot z - \pi}{2z} \right) \right].$$

При этом  $z \geq 3$ .

Следует отметить, что этот вариант профилей зубьев используется для колес Рута, применяемых в воздухоудках [4].

Для предотвращения «подрезания» зубьев, то есть для того, чтобы толщина ножки зуба была не меньше толщины головки зуба, должно быть

$$R \leq 0,25R$$

или

$$r \cdot \sin \frac{\pi}{2z} \leq 0,25r.$$

Откуда  $z \geq 6$ .

Волновой «радиусный» профиль можно также использовать для штифтового соединения. Штифт с боковой волновой поверхностью, закаленный до высокой твердости, устанавливается в цилиндрические отверстия соединяемых деталей, деформируя последние – выдавливая выступы и впадины. Этим можно создать надежное соединение с высокой точностью соединения. Из-за относительно малых упругих деформаций высота

зубьев должна быть небольшой. Минимальную высоту зубьев можно определить, используя рис.4.

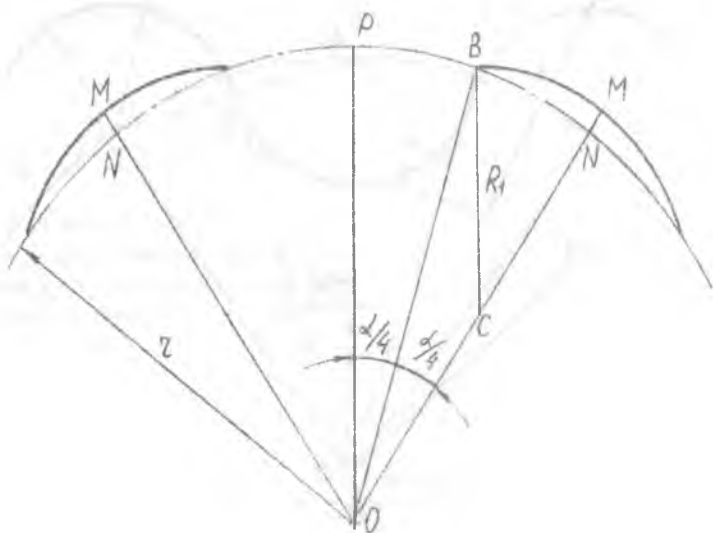


Рис.4

Если радиус  $OP$  параллелен радиусу  $R_1$ , то радиус впадин  $R_2$  будет равен бесконечности. При этом

$$R_1 = \frac{r}{2 \cdot \cos \pi / 2z},$$

$$MN = 0,5h = r \left( \frac{1 - \cos \pi / 2z}{\cos \pi / 2z} \right).$$

Следовательно, должно быть

$$R_1 < \frac{r}{2 \cos \pi / 2z},$$

$$h > 2r \left( \frac{1 - \cos \pi / 2z}{\cos \pi / 2z} \right).$$

Предлагаемая расчётная схема и расчёт прочности соединения могут быть основой для более точного расчёта с учётом распределения и концентрации напряжений в зависимости от величины зазоров в соединении.

## Список литературы

1. Решетов Д.Н. Детали машин.- М.: Машиностроение. 1989.- 496 с.
2. Кисляков В.В., Горшков Г.А. Определение профиля зубьев инструмента для обработки волнообразных поверхностей деталей волновых передач с гибкими связями// Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 28-30.
3. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
4. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений.- М. , 1960.- 444 с.

### **ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ**

Журавлёв О.А., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д.  
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

При разработке объектов авиационной и космической техники, в частности турбин энергетических установок, с целью увеличения их ресурса и надёжности, важную роль играет исследование спектра и формы собственных колебаний особо ответственных деталей, работающих в условиях повышенных вибрационных нагрузок, например, лопаток газовых турбин.

В настоящее время для исследования резонансных свойств деталей и, прежде всего, формы их собственных колебаний, наибольшее распространение получили бесконтактные, в частности, оптические методы.

Одним из методов бесконтактного исследования формы собственных колебаний деталей является голографическая интерферометрия [1]. Как известно, для успешного проведения голографической интерферометрии необходимо выполнение, по крайней мере, двух условий: наличие регистрирующей среды с высоким пространственным разрешением (в настоящее время это, в основном, специально для этих целей разработанные голографические фотоматериалы) и эффективная виброизоляция измерительной схемы. Наличие “мокрой” технологии обработки фотоматериалов исключает оперативность получения информации и затрудняет автоматизацию процесса измерения, а необходимая виброизоляция измерительной схемы требует увеличения массы измерительной установки.

Более совершенным методом исследования формы собственных колебаний детали является так называемая электронная спекл-интерферометрия [2]. В электронной спекл-интерферометрии регистри-