

3. Профилирование режущих инструментов в среде *t-flexcad 3d*/ Петухов Ю.Е. :Вестник машиностроения. 2003, № 8. – с. 67.
4. Особенности проектирования фасонных фрез для обработки поверхностей с прямолинейными образующими/ Чулин И.В.: СТИН, 2011. № 12. - с. 13-16.
5. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки боковой поверхности «остряка» стрелочных переводов/ Чулин И.В.: Вестник МГТУ Станкин, 2011. № 1. - с. 56-60.
6. Точность профилирования при обработке винтовой фасонной поверхности /Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин: СТИН, №7-2011 - с. 14-17.
7. Способ формообразования фасонной винтовой поверхности стандартным инструментом прямого профиля/ Ю.Е.Петухов, П.В. Домнин: Вестник МГТУ “Станкин”, № 3 (15), 2011 - с.102-106.
8. Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки на заготовке концевой фрезы/ Ю.Е.Петухов, П.В., Домнин: "Известия МГТУ МАМИ" №2 (12), 2011, - с. 156-164.
9. Решение обратной задачи профилирования на базе схемы численного метода заданных сечений /Ю.Е.Петухов, П.В., Домнин: "Инженерный журнал СПРАВОЧНИК", №11 2011 - с. 26-29.
10. Ступенчатое сверло/ Гречишников В.А., Романов В.Б., Юнусов В.В. патент на полезную модель *RUS 133446 17.04.2013*

### **Экспериментальное определение осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин крупных резьб**

д.т.н. Овсенко А.Н.<sup>1</sup>, к.т.н., Клауч Д.Н.<sup>1</sup>, Носов Д.П.<sup>1</sup>, д.т.н. Кудинов А.А.<sup>1</sup>, Болотин Г.А.<sup>1</sup>,  
Котов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», <sup>2</sup> ОАО «ЗиО - Подольск»  
8(495) 675-83-05, [dnklauch@cniitmash.ru](mailto:dnklauch@cniitmash.ru), 8(495) 747-10-25, [zio@eatom.ru](mailto:zio@eatom.ru)

*Аннотация.* В статье описана методика экспериментального определения осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин (дна) крупных резьб и результаты определения напряжений в резьбе М64х6.

*Ключевые слова:* резьба, образец, поверхностный слой (ПС), деформации (перемещения), остаточные напряжения

Впадины резьбы являются сильными концентраторами напряжений, по которым при переменных нагрузках в основном происходят усталостные разрушения деталей с резьбой.

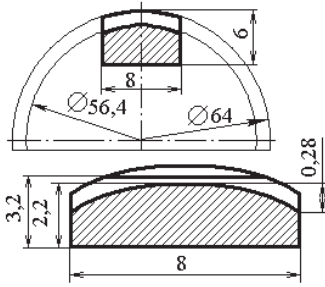
Наиболее важным показателем качества ПС, влияющим на сопротивление усталости, являются остаточные напряжения (их знак, величина и характер распределения). Определение и контроль остаточных напряжений в ПС резьбы связан с большими трудностями и наиболее надежно может проводиться механическими разрушающими методами. Для этого из деталей с крупной резьбой методами, не влияющими на остаточные напряжения (например электроэрозией), вырезаются продольные и кольцевые образцы требуемых размеров.

Осевые остаточные напряжения, т.е. напряжения, действующие в направлении продольной оси резьбы, определяются на продольном образце, размеры поперечного сечения которого должны быть такими, чтобы без большой погрешности его можно было считать прямоугольным. Для наружной резьбы (шпильки) М64х6 размеры и схема вырезки приведены на рисунке 1.

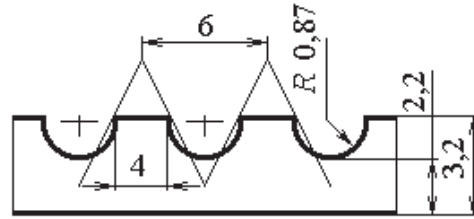
После вырезки определяется стрела прогиба  $f_0$  в середине образца, вершины резьбы удаляются фрезерованием с последующим травлением до общей толщины образца 3,2 мм и толщины в зоне дна резьбы  $\delta = 2,2$  мм (рисунок 2).

Остаточные напряжения в ПС дна резьбы на шпильке определяются как алгебраическая сумма напряжений, возникающих от деформаций образца при вырезке, и остаточных напряжений, рассчитанных по деформациям образца в процессе травления напряженного ПС.  $\sigma_0(a) = \sigma_0^e(a) + \sigma_0^0(a)$ ; где:  $\sigma_0^e(a)$  - линейная составляющая остаточных напряжений, определяемая по его относительному удлинению  $\varepsilon_e$  и изгибу ( $f_0$  – стреле прогиба в середине

образца);  $\sigma_0^e(a) = \sigma_u^e(a) + E \cdot \varepsilon_e$ ;  $\sigma_0^0(a)$  - нелинейная составляющая остаточных напряжений, которая определяется по деформациям образца при удалении напряжённого слоя «а» травлением.



**Рисунок 1. Размеры и схема вырезки продольного образца из шпильки М64х6, длина образца  $l = 60...80$  мм**



**Рисунок 2. Размеры образца в зоне дна резьбы М64х6**

При механической обработке глубина ПС с высокими остаточными напряжениями мала по сравнению с толщиной вырезаемого образца ( $a/\delta < 0,1$ ). Поэтому можно принять  $\varepsilon_s = 0$  и учитывать только изгибные деформации образца от вырезки  $\sigma_u^e(a)$ .

Расчеты показывают, что момент инерции поперечного сечения участков образцов, соседних со впадинами резьбы, во много раз превышает момент инерции сечения в зоне впадин. Поэтому с достаточной точностью можно считать, что изгиб всего продольного образца возникает только от действия изгибающих моментов на участках впадин. Выведем зависимость для расчета  $\sigma_u^e(a)$  по стреле прогиба  $f_0$  в середине продольного образца, измеренной после его вырезки, но до удаления вершин резьбы.

Расчетная схема приведена на рисунке 3.

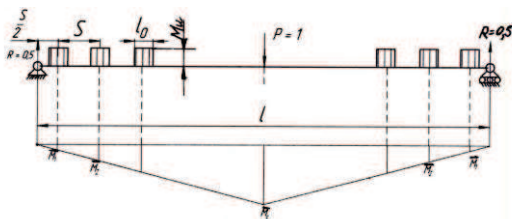
Стрела прогиба  $f_0$  связана с изгибающим моментом, возникающим на участках  $l_0$  продольного образца под действием напряжений  $\sigma_u^e(a)$ , зависимостью Верещагина:

$$f_0 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E \cdot J(0)} \int M_{и} \bar{M}_i dl. \quad (1)$$

Для схемы нагружения, приведенной на рисунке 4, зависимость (1) имеет следующий вид:

$$f_0 = \frac{l_0 \cdot M_{и}}{EJ(0)} \sum_{i=1}^n \bar{M}_i; \quad (2)$$

где:  $l_0$  - ширина впадины резьбы ( $l_0 = 2r$ );  $M_{и}$  - усредненный изгибающий момент в зоне впадины резьбы, возникающий при вырезке образца;  $j_0$  - усредненный момент инерции поперечного сечения образца в зоне впадины резьбы (до травления);  $n$  - количество впадин на длине образца,  $n = l/S$ ;  $E$  - модуль упругости материала образца;  $\bar{M}_i$  - изгибающий момент от единичной силы ( $P = 1$ ) на  $i$  - м участке образца.



**Рисунок 3. Схема нагружения продольного образца и эпюра изгибающих моментов от единичной силы**



**Рисунок 4. Схема измерения деформаций образца с использованием рычага-увеличителя и эпюра изгибающих моментов от единичной силы ( $P=1$ )**

Максимальные напряжения на поверхности впадины резьбы  $\sigma_u^{max}$  и напряжения  $\sigma_u^e(a)$ , на глубине «а», возникающие при изгибе образца, определяются по зависимостям

$$\sigma_u^B(0) = \frac{\delta \cdot M_u}{2J(0)}; \sigma_u^s(a) = \sigma_u^{max} \cdot \left(1 - 2\frac{a}{\delta}\right) = \frac{M_u}{2 \cdot J(0)} (\delta - 2a)$$

где:  $\delta$  – усредненная толщина образца в зоне впадин резьбы.

Из формулы (2) получим:  $M_n / j_0 = Ef_0 / l_0 \sum_{i=1}^n \bar{M}_i$ . Тогда:  $\sigma_n^B(a) = \frac{E \cdot f_0 \cdot (\delta - 2a)}{l_0 \cdot S \sum_{i=1}^{0,5n} (2i - 1)}$ .

В соответствии с рисунком 4 ( $n$  – четное число):  
 $\bar{M}_1 = \frac{S}{4}$ ;  $\bar{M}_2 = \frac{3S}{4}$ ;  $\bar{M}_3 = \frac{5S}{4}$  и т.д. до  $\frac{n}{2}$ ;

$$\sum_{i=1} \bar{M}_i = \frac{S}{2} \sum_{i=1} (2i - 1); \sigma_n^B(a) = \frac{E \cdot f_0 \cdot (\delta - 2a)}{l_0 \cdot S \sum_{i=1}^{0,5n} (2i - 1)} \quad (3)$$

Пример:  $f_0 = 0,05$  мм;  $\delta = 2,2$  мм;  $a = 0$ ;  $l_0 = 2$  мм;  $S = 6$  мм;  $n = 10$ .

$$\sigma_u^s(0) = \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 2,2 \cdot 0,05}{2 \cdot 6 \cdot 25} = 77 \text{ МПа}$$

на глубине  $a = 0,2$  мм,  $\sigma_u^s(0,2) = 63 \text{ МПа}$

Определение нелинейной составляющей остаточных напряжений в ПС впадины резьбы проводится с использованием специальной методики и установки.

На конец образца, как его продолжение или перпендикулярно его продольной оси, закрепляется рычаг-увеличитель длиной  $L$ . (рисунок 4.) Все поверхности образца и рычага, кроме дна резьбы, покрываются защитным лаком, и образец с рычагом-увеличителем монтируется в установке. Поверхностный слой дна резьбы подвергается травлению, в процессе которого по перемещению  $F(a)$  конца рычага-увеличителя измеряются деформации (стрела прогиба) образца  $f(a)$ .

Для схемы нагружения и измерения деформаций образца по перемещениям рычага-увеличителя  $F(a)$ , представленной на рисунке 4, формула Верещагина имеет следующий вид

$$F(a) = \frac{l_k \cdot M(a)}{E \cdot J(a)} \sum_{i=1}^n \bar{M}_i; \quad (4)$$

где:  $M(a)$  – изгибающий момент, возникающий в результате удаления слоя «а» с остаточными напряжениями  $\sigma_n^0(a)$  с каждого участка (впадины), включая боковые поверхности;  $j(a)$  - момент инерции поперечного сечения образца на участке травления после удаления напряженного слоя «а»;  $l_k = l + 2a$  - длина канавки после удаления слоя «а»;  $\bar{M}_i$  - изгибающий момент от единичной силы ( $P = 1$ ) на  $i$  – м участке образца.

$$\bar{M}_i = L + l - \frac{l_k}{2} - (i - 1) \cdot S$$

$$F(a) = \frac{l_k \cdot M(a)}{E \cdot J(a)} \left[ \left( L + l - \frac{l_k}{2} \right) n - S \sum_{i=1}^n (i - 1) \right]$$

Представим последнюю зависимость в следующем виде:

$$F(a) = \frac{l_k^2 - n^2}{2E} \cdot \frac{M(a)}{J(a)} \left[ \frac{2L - l_k}{l_k \cdot n} + \frac{2S}{l} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (i - 1) \right) \right]$$

Или

$$F(a) = \frac{l_0^2 - n_i^2}{2E} \cdot \frac{M(a)}{J(a)} k_B; \quad (5)$$

где:  $l_k n$  - общая длина участков травления;  $k_B$  - коэффициент увеличения (за счет рычага и участков, которые не травятся).

$$k_B = \frac{2L - l_k}{l_k \cdot n} + \frac{2S}{l_k} \left( 1 - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (i - 1) \right). \quad (5)$$

В случае установки рычага-увеличителя перпендикулярно оси образца на его конце:  $\bar{M}_i = \bar{M} = L$ ;

$$F(a) = \frac{M(a) \cdot l_k}{E \cdot J(a)} \sum_{i=1}^n \bar{M}_i = \frac{l_k \cdot n \cdot L}{E} \cdot \frac{M(a)}{J(a)} \quad (6)$$

Представим последнее выражение в виде (с коэффициентом увеличения  $k_n$ ):

$$F(a) = \frac{l_0^2 - n_i^2}{2E} \cdot \frac{M(a)}{J(a)} k_n; \quad (7)$$

$$k_n = 2L / l_k \cdot n. \quad (8)$$

Для образцов с поперечным сечением, близким к прямоугольной форме шириной « $b$ » и толщиной « $\delta$ », момент инерции и изгибающий момент, возникающий от удаления слоя « $a$ » с остаточными напряжениями  $\sigma_0(x)$ , определяются следующими зависимостями:

$$J(a) = \frac{b \cdot (\delta - a)^3}{12}; \quad M(a) = \frac{b \cdot (\delta + a)}{2} \int_0^a \sigma_0^0(x) \cdot dx - b \int_0^a \sigma_0^0(x) \cdot x \cdot dx$$

Тогда зависимости (5) и (7) можно представить в следующем обобщённом виде:

$$F(a) = k \frac{3l_k^2 \cdot n^2}{E \cdot (\delta - a)^3} [(\delta - a) \int_0^a \sigma_0^0(x) dx - 2 \int_0^a \sigma_0^0(x) \cdot x dx]; \quad (9)$$

где:  $k = k_b$  по формуле (6) для случая установки рычага-увеличителя вдоль образца;  $k = k_n$  по формуле (8) для случая установки рычага-увеличителя перпендикулярно продольной оси образца.

Продифференцировав правую и левую часть выражения (9) по параметру  $a$ , после соответствующих преобразований получаем формулу для расчета остаточных напряжений  $\sigma_0(a)$  в следующем виде:

$$\sigma_0(a) = \frac{E(\delta - a)}{3k \cdot l_k^2 \cdot n^2} \{F'(a) \cdot (\delta - a) - F(a)[3 + (\delta - a)(\frac{K'}{K} + \frac{4}{l_k})]\} - \frac{1}{\delta - a} \int_0^a \sigma_0(k) dx; \quad (10)$$

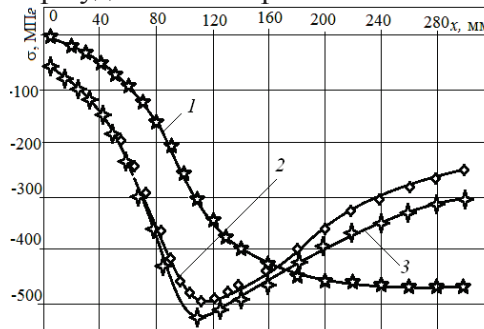
где:  $F'(a) = \frac{dF(a)}{da}$ ;  $k' = \frac{dk}{da}$ ; для перпендикулярного рычага – удлинителя  $k' = -\frac{4L}{nl_k^2}$ ; для про-

дольного рычага-удлинителя:  $k'_b = -\frac{4}{l_k^2} \left[ \frac{l}{n} + S(1 - \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n (i-1)) \right]$ .

По формуле (10) остаточные напряжения в слое « $a$ » рассчитываются с учетом ранее определенных напряжений в предыдущих слоях.

Ниже приведен пример определения продольных (осевых) остаточных напряжений во впадинах резьбы М64х6 в вырезанном образце без учета изменения напряжений в результате вырезки образца по методике, изложенной в работе [2]. При  $L = 90$  мм,  $l_k = 2$  мм,  $S = 6$  мм,  $n = 10$ ,  $\delta = 2,2$  мм,  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа после удаления слоя  $a = 0,33$  мкм;  $k_b = 9,36$ .

На рисунке 5 приведены результаты измерения деформаций образца по перемещениям  $F(x)$  рычага-увеличителя по мере удаления напряженного



**Рисунок 5. График перемещений  $F(x)$  рычага – увеличителя по глубине снятого слоя (1) при травлении продольного образца и эпюры осевых остаточных напряжений: 2 – рассчитанные по полной формуле; 3 – рассчитанные без учета слагаемого с интегралом ПС впадин путем электрохимического травления, а также результаты расчета остаточ-**

ных напряжений  $\sigma_0^0(x)$  по графику перемещений.

Результаты расчетов показывают, что при определении остаточных напряжений в относительно тонких поверхностных слоях ( $\frac{a}{b} < 0,05$ ) в формуле (10) с погрешностью менее 5% можно не учитывать слагаемое с интегралом.

#### Заключение

В статье изложена новая методика определения осевых остаточных напряжений в поверхностном слое впадин (дна) крупных резьб на вырезанных продольных образцах.

#### Литература

1. Остаточные напряжения/ Биргер И.А.: М.: Машгиз, 1963 г.
2. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения/ Овсенко А.Н., Клауч Д.Н., Кущева М.Е.: М., МГТУ «Станкин», 2006 г.
3. Технологические остаточные напряжения/ Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И., Серебренников Г.З.: М.: Машиностроение. 1973 г.

### **Совершенствование технологии нарезания модифицированных глобоидных передач с локализованным пятном контакта**

к.т.н. Федотов Б.Ф., Думилин С.В., д.т.н. Щегольков Н.Н., Беляков В.Н.  
ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»  
8(495)675-85-05 dumilin87@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрены возможности совершенствования технологии изготовления модифицированных глобоидных передач с локализованным пятном контакта. Разработана технология модифицированной глобоидной передачи, локализации пятна контакта, а так же конструкция режущего инструмента для нарезания глобоидных червяков и колес.

*Ключевые слова:* глобоидная передача, глобоидный редуктор, программа расчёта геометрии передачи, технология, механическая обработка

Среди червячных передач глобоидные передачи имеют неоспоримые преимущества по сравнению с червячными передачами с цилиндрическим червяком по нагрузочной способности, долговечности и к.п.д. Благодаря этим преимуществам глобоидные передачи получили широкое распространение в приводах тяжелого, энергетического, транспортного, горношахтного и другого оборудования.

Преимущества глобоидных передач связаны как с их конструктивными особенностями, так и со свойством модифицированного зацепления с локализованным пятном контакта.

Конструкция передачи имеет ряд особенностей. Благодаря вогнутой форме глобоидного червяка в зацеплении с витками находится большое число зубьев колеса. Если в червячной передаче коэффициент перекрытия обычно не превышает двух, то в глобоидной передаче число зубьев в обхвате червяком может быть от четырех и более. Соответственно, уменьшается нагрузка, приходящаяся на один зуб.

Радиус приведенной кривизны контакта в направлении, перпендикулярном контактной линии, в глобоидной передаче значительно больше, чем в червячной передаче. Это связано с тем, что в глобоидной передаче выпуклая поверхность витка червяка контактирует с вогнутой поверхностью зуба колеса, тогда как в червячной передаче обе поверхности выпуклые. Поэтому в глобоидной передаче при той же линейной нагрузке контактные напряжения меньше.

Для работы передачи важно расположение вектора скольжения относительно направления контактной линии, так называемый угол смазывания. Чем ближе угол смазывания к  $90^\circ$ , тем больше масла попадает в контакт, тем он лучше смазывается и тем большую нагрузку контакт может передавать при более низком коэффициенте трения. Соответственно, повышается к.п.д. передачи и привода в целом. Если угол смазывания близок или равен нулю – масло не попадает в контакт и смазывание не происходит или происходит недостаточно и