

УДК 620.17:621.773.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВПАДИН РЕЗЬБЫ

© А. Н. Овсеенко<sup>1</sup>, Д. Н. Клауч<sup>1</sup>, Д. П. Носов<sup>1</sup>,  
А. А. Пономарёв<sup>1</sup>, И. В. Котов<sup>2</sup>, В. М. Терехов<sup>2</sup>

Статья поступила 2 июня 2016 г.

Изложена методика экспериментального определения осевых и тангенциальных (окружных) остаточных напряжений в поверхностном слое впадин (дна) крупной резьбы с учетом плоского напряженного состояния. По данной методике построены эпюры распределения остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя впадин наружной резьбы М64 × 6 с учетом плоского (двухосного) напряженного состояния. Из детали с резьбой вырезали продольные и кольцевые образцы с размерами поперечных сечений, обеспечивающими их линейное напряженное состояние. В специальной установке поверхностный слой впадин резьбы удаляли электрохимическим травлением с измерением остаточных деформаций образца. Получены зависимости для расчета осевых и тангенциальных остаточных напряжений по деформациям образцов от вырезки и удаления поверхностного слоя.

**Ключевые слова:** резьба; впадина, канавка; поверхностный слой; образец продольный; образец кольцевой; вырезка; разрезка; остаточные деформации; измерение; остаточные напряжения; метод определения; эксперимент.

Резьбовые соединения атомных энергетических установок, паровых, газовых и гидравлических турбин, парогенераторов, теплообменных аппаратов и других ответственных конструкций работают в условиях больших статических и динамических нагрузок, при повышенных температурах, радиационном облучении, в коррозионной среде. Поэтому к ним предъявляются высокие требования по прочности и надежности.

Типичным примером крупных резьбовых соединений, широко применяемых, в частности, в атомных и энергетических установках, может служить соединение с метрической резьбой М64 × 6 (рис. 1); радиус впадин резьбы  $r_0 = H/6 = 0,866$  мм.

Впадины резьбы — концентраторы напряжений, в которых при переменных нагрузках в основном происходят усталостные разрушения деталей. Поэтому технологический процесс обработки резьбы должен обеспечить ее заданную точность и сформировать поверхностный слой (ПС) с высокими эксплуатационными свойствами.

Одним из важных показателей качества ПС, влияющих на сопротивление усталости, являются остаточные напряжения (их знак, величина и характер распределения). Вместе с тем решение задачи определения остаточных напряжений в ПС резьбы связано со значительными трудностями. Известные методы определения остаточных напряжений в ПС деталей с концентраторами напряжений [4, 5] применительно к деталям с резьбой требуют существенных уточнений.

Исследование показывает, что в ПС впадины резьбы остаточные напряжения наиболее надежно можно определить разрушающими методами. Для этого из трубы с крупной наружной резьбой (рис. 2, а) вырезают продольные и кольцевые образцы (рис. 2, 1, 2). Технология вырезки образцов должна исключать создание дополнительных ОН. На основе результатов исследований ОН [5] можно сделать вывод, что напряжения в зоне вершин витков резьбы незначительные, поэтому ее можно предварительно срезать (рис. 2, б).

Соотношение ширины  $b$  и толщины  $\delta$  образца ( $b/\delta$ ) должно быть таким, чтобы напряженное состояние в ПС образцов в зоне впадины можно было считать близким к одноосному. При этом необходимо, чтобы толщина образца  $\delta$  в 3–5 раз превышала глубину исследуемого напряженного слоя  $a$ , а ширина продольного образца — ограничивалась соотношением [4]

$$b \leq 0,4\sqrt{R_n \delta},$$

где  $R_n$  — радиус наружной поверхности образца.

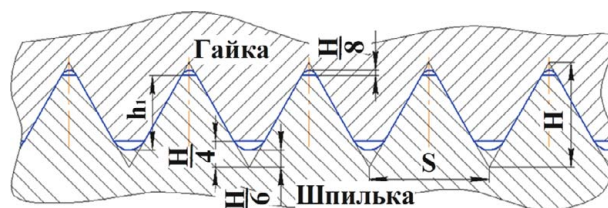


Рис. 1. Основные геометрические параметры метрической резьбы:  $S = 6$  мм — шаг резьбы;  $H = 0,866S = 5,196$  мм;  $h_1 = 17H/24 = 3,68$  мм

<sup>1</sup> АО «НПО «ЦНИТМАШ», Москва, Россия;  
e-mail: cniitmash@cniitmash.ru

<sup>2</sup> ПАО «ЗиО-Подольск», г. Подольск, Россия;  
e-mail: zio@eatom.ru

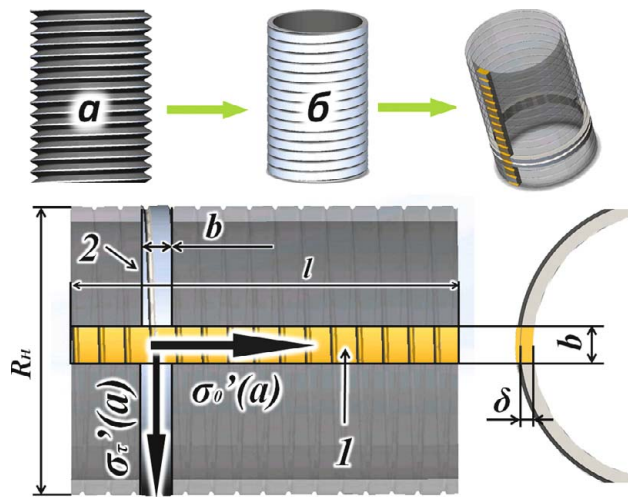


Рис. 2. Схема вырезки образцов с наружной (резьбовой) поверхности детали: 1 и 2 — продольный и поперечный (кольцевой) образцы

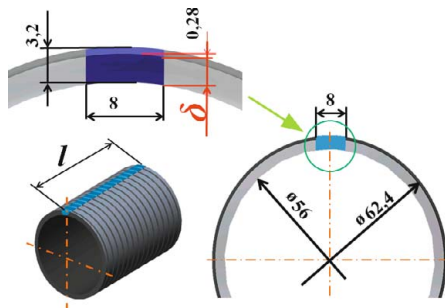


Рис. 3. Схема вырезки и размеры продольного образца из шпильки М64 × 6: длина образца  $l = 60 - 80$  мм;  $\delta = 1,5 - 2,2$  мм

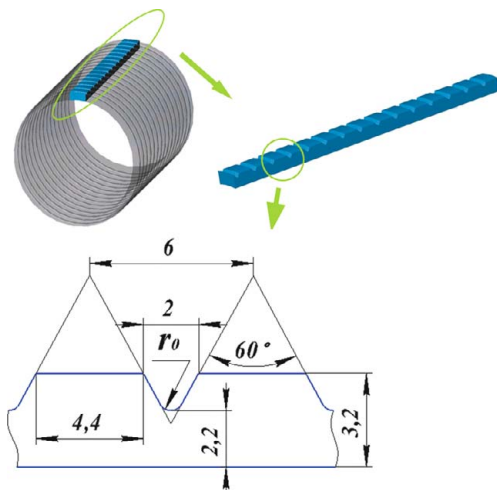


Рис. 4. Размеры продольного (осевого) образца в зоне впадины резьбы М64 × 6

Кроме того, размеры образцов должны обеспечить необходимую точность измерения деформаций, возникающих в результате вырезки и при последующем удалении ПС с остаточными напряжениями.

Пренебрегая влиянием на искомые остаточные напряжения снятия ОН, имевших место на боковых поверхностях образца, получаем, что осевые  $\sigma'_0(a)$  и тангенциальные  $\sigma'_\tau(a)$  остаточные напряжения в ПС резьбовой канавки (дна) можно рассчитывать по формулам плоского напряженного состояния:

$$\sigma'_0(a) = \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_0(a) + \mu\sigma_\tau(a)],$$

$$\sigma'_\tau(a) = \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_\tau(a) + \mu\sigma_0(a)],$$

где  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\sigma_0(a)$  и  $\sigma_\tau(a)$  — остаточные напряжения в продольном и кольцевом образцах с учетом вырезки и разрезки. ОН в указанных образцах определяют по формулам

$$\sigma_0(a) = \sigma_0^0(a) + \sigma_0^B(a); \quad \sigma_\tau(a) = \sigma_\tau^0(a) + \sigma_\tau^{BP}(a),$$

где  $\sigma_0^0(a)$  — остаточные напряжения в вырезанном продольном образце;  $\sigma_\tau^0(a)$  — остаточные напряжения в вырезанном и разрезанном кольцевом образце;  $\sigma_0^B(a)$  и  $\sigma_\tau^{BP}(a)$  — изменения остаточных напряжений в продольном образце в результате вырезки и кольцевом образце в результате вырезки и разрезки.

По результатам деформационных откликов, возникающих при вырезке продольного образца (см. рис. 2, 1), а также вырезки и последующей разрезки (по методу Давиденкова) кольцевых образцов (см. рис. 2, 2) могут быть найдены величины искомых осевых и тангенциальных напряжений. Для этого следует измерить прогиб продольного образца после его вырезки из основного, а также — изменения среднего диаметра кольцевого образца после его разрезки.

#### Определение осевых остаточных напряжений

Осевые остаточные напряжения, действующие в направлении продольной оси резьбы, определяли на вырезанном продольном образце, схемы вырезки и размеры которого для шпильки с резьбой М64 × 6 приведены на рис. 3. Размеры в зоне впадины резьбы показаны на рис. 4. Перед вырезкой на вершине резьбы по образующей (параллельно продольной оси шпильки) наносили риски и измеряли прямолинейность образующей по трем точкам (двум — на краях, одной — в середине вырезаемого образца). После вырезки способом, не влияющим на остаточные напряжения, в тех же трех точках и определяли стрелу прогиба в середине образца.

В результате вырезки образца происходит нарушение равновесия исходных остаточных напряжений и возникают остаточные деформации образца (изгиб и изменение длины). Исходные остаточные напряжения изменяются на величину

$$\sigma_0^B(a) = \sigma_0^0(a) + E\varepsilon_B,$$

где  $\sigma_0^B(a)$  и  $E\varepsilon_B$  — изменение остаточных напряжений в результате изгиба и продольной деформации  $\varepsilon_B$  вы-

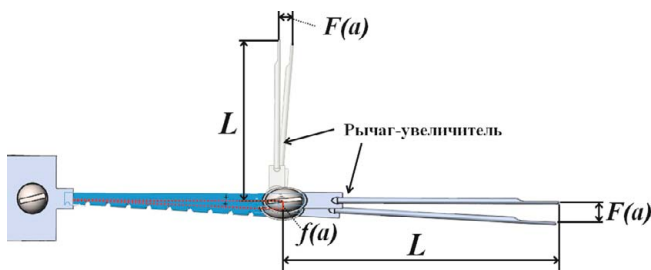


Рис. 5. Схема измерения деформаций образца с использованием рычага-увеличителя

резанного образца;  $E$  — модуль упругости материала образца.

При механической обработке на чистовых режимах относительная толщина искаженного ПС, который вызывал дополнительные остаточные напряжения, небольшая ( $a/\delta < 0,1$ ). Поэтому можно считать  $\epsilon_B = 0$  и учитывать изменение напряжений при вырезке только от изгибных деформаций ( $\sigma_0^B(a) = \sigma_{II}^B(a)$ ). Схема нагружения продольного образца приведена на рис. 5.

Определение осевых остаточных напряжений в ПС впадины резьбы проводили с использованием специальных методики и установки.

На конце продольного образца вдоль или перпендикулярно его продольной оси закрепляли рычаг-увеличитель длиной  $L$ . Все поверхности образца и рычага, кроме дна резьбовой канавки, покрывали защитным лаком, и образец с рычагом-увеличителем монтировали в установке. Поверхностный слой дна резьбы подвергался травлению, в процессе которого по перемещениям  $F(a)$  конца рычага-увеличителя измеряли деформации (стрелу прогиба) образца  $f(a)$ .

По полученным данным на основе формул сопротивления материалов определяли усредненные величины осевых ОН, имевших место в каждой из впадин.

На рис. 6 приведен экспериментальный график перемещений  $F(a)$  продольно установленного рычага-увеличителя длиной  $L = 41$  мм, а также определенные по разработанной методике осевые остаточные напряжения в поверхностном слое впадин резьбы М64 × 6 на вырезанном образце с учетом и без учета его вырезки из детали. Характеристики вырезанного образца:  $l_0 = 2$  мм;  $S = 6$  мм;  $n = 10$ ;  $a = 0,3$  мм;  $\delta = 2,2$  мм;  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа.

После вырезки прогиб в середине образца составил  $-0,02$  мм (сторона со впадинами выпуклая) и вызвал изменение исходных остаточных напряжений в поверхностном слое на величину

$$\sigma_{II}^B(a) = \frac{2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,02(2,2 - 2a)}{2 \cdot 6 \cdot 25} = -28(1,1 - a), \text{ МПа.}$$

На поверхности впадин ( $a = 0$ ) и на глубине  $a = 0,3$  мм значения  $\sigma_{II}^B$  составили  $-40,8$  и  $-60,4$  МПа.

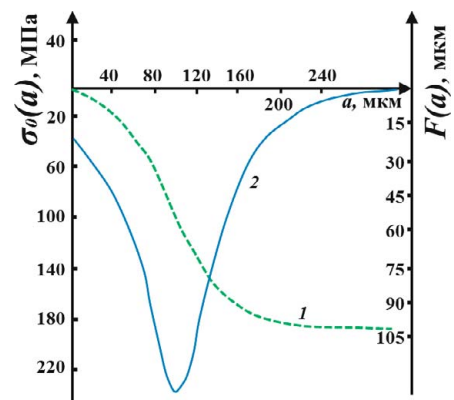


Рис. 6. График перемещений  $F(a)$  рычага-увеличителя по глубине снятого слоя (1) продольного образца и эпюры осевых остаточных напряжений (2)

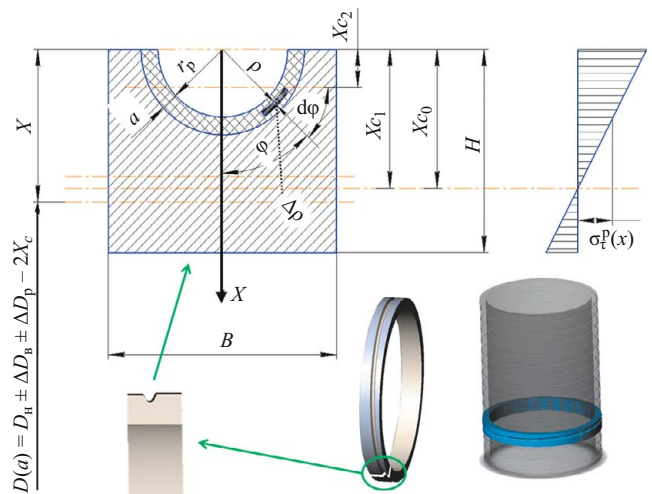


Рис. 7. Схема поперечного сечения кольцевого образца с наружной канавкой

### Определение тангенциальных (окружных) остаточных напряжений

Для определения тангенциальных (окружных) остаточных напряжений  $\sigma_t(a)$  из детали с резьбой вырезали кольцевые образцы с наружным диаметром  $D_H$ , толщиной кольца  $H$  и шириной  $B$ , равной примерно  $1,5S$  ( $S$  — шаг резьбы). Количество образцов — 10, расстояние между ними — 1 мм. Схема кольцевого образца с канавкой радиусом  $r_0$  и  $\phi = \pi/2$  представлена на рис. 7.

В результате вырезки средний диаметр кольца изменяется на величину  $\Delta D_B = D_0 - D'_0$ , где  $D_0$  и  $D'_0$  — диаметры окружности, проходящей через центр тяжести поперечного сечения кольцевого образца до и после вырезки соответственно. Диаметр  $D_0 = D_H - 2X_{co}$ , где

$$X_{co} = \frac{3BH^2 - 4(r_0)^3}{3[2BH - \pi(r_0)^2]}$$

координата (от наружной поверхности) центра тяжести поперечного сечения образца.

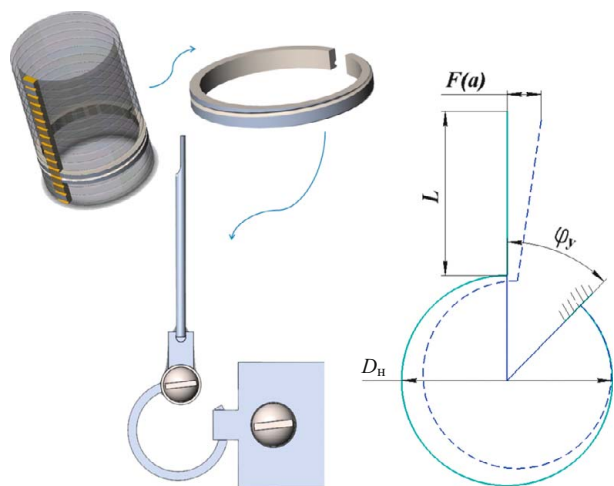


Рис. 8. Схема измерения остаточных деформаций кольцевого образца по перемещениям  $F(a)$  рычага-увеличителя:  $D_n = \pm \Delta D_p \pm \Delta D_b$

Исходные остаточные напряжения изменятся от вырезки равномерно по всему сечению кольца на величину

$$\sigma_{\tau}^B = \frac{\Delta D_B}{D_0} E,$$

где  $E$  — модуль упругости материала кольца.

В результате разрезки и последующего удаления кольцевого сектора с углом  $\varphi_y$  кольцо превращается в изогнутый брус. Распределение снимаемых при этом кольцевых ОН по толщине сечения можно считать линейным:

$$\sigma_{\tau}^P(\rho, \varphi) = 2E \frac{\Delta D_p}{(D_0 \pm \Delta D_B)^2} (X_{co} - X) = A(X_{co} - \rho \cos \varphi),$$

где  $\rho, \varphi$  — текущий радиус и угол в полярной системе координат;  $\Delta D_p$  — изменение диаметра образца после разрезки;

$$A = 2E \frac{\Delta D_p}{(D_0 \pm \Delta D_B)^2}.$$

Исходные остаточные напряжения в поверхностном слое радиусной канавки определяют как алгебраическую сумму (принцип суперпозиции):

$$\sigma_{\tau}(\rho) = \sigma_{\tau}^0(\rho, \varphi) + \sigma_{\tau}^P(\rho, \varphi) - \sigma_{\tau}^B,$$

откуда

$$\sigma_{\tau}^0(\rho, \varphi) = \sigma_{\tau}(\rho) - \sigma_{\tau}^P(\rho, \varphi) + \sigma_{\tau}^B,$$

где  $\sigma_{\tau}^0(\rho, \varphi)$  — остаточные напряжения в вырезанном и разрезанном кольцевом образце.

Для оценки распределения остаточных напряжений  $\sigma_{\tau}^0(\rho, \varphi)$  по глубине поверхностного слоя путем его удаления и измерения остаточных деформаций об-

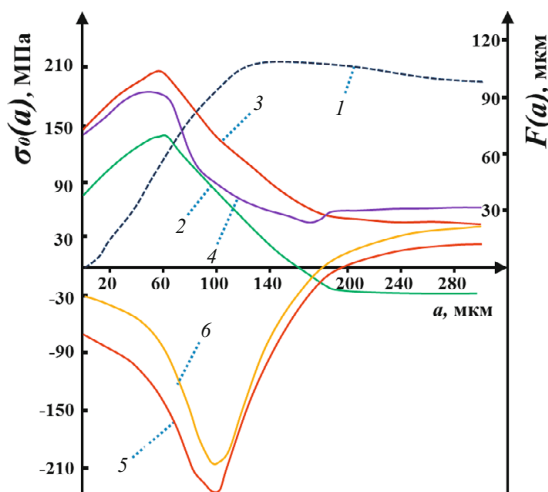


Рис. 9. График перемещений рычага-увеличителя  $F(a)$  по глубине снятого слоя (1) кольцевого образца и эпюры остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы: тангенциальные в кольцевом образце без учета вырезки и слагаемого с интегралом (2); тангенциальные в кольцевом образце с учетом вырезки (3); тангенциальные в детали (4); осевые в продольном образце с учетом вырезки (5); осевые в детали (6)

разца на один его конец устанавливали рычаг-увеличитель длиной  $L$  (рис. 8) [2].

Поверхности, с которых не должен удаляться поверхностный слой, покрывали защитным лаком. Образец с рычагом-увеличителем закрепляли в специальной установке, в которой в процессе удаления напряженного поверхностного слоя канавки электрохимическим травлением измеряли перемещения  $F(a)$  рычага-увеличителя. Они возникают в результате изменения диаметра кольцевого образца (остаточных деформаций). Такая схема измерения по сравнению с прямым измерением изменения диаметра образца  $\Delta D(a)$  позволяла получить его большие значения.

В результате удаления с радиусной канавки слоя толщиной  $a$  с остаточными напряжениями  $\sigma_{\tau}^0(\rho, \varphi)$  возникает изгибающий момент  $M(a)$ , который вызывает изменение среднего диаметра образца  $\Delta D(a)$ .

Можно рассчитать остаточные напряжения послойно и определить эпюру распределения остаточных напряжений  $\sigma_{\tau}(a)$  в поверхностном слое  $a$  наружной радиусной канавки по ранее найденным напряжениям.

По изложенной методике определены тангенциальные остаточные напряжения в поверхностном слое радиусных впадин наружной резьбы М64 × 6. Вырезанный полукольцевой образец имел следующие характеристики:  $D_n = 54,68$  мм;  $D_0 = 51,2$  мм;  $B = 6$  мм;  $H = 3,2$  мм;  $r_0 = 1$  мм;  $\delta = 2,2$  мм,  $\varphi_y = \pi$ ,  $X_{c0} = 1,704$  мм;  $\Delta D_b = 0,015$  мм;  $\Delta D_p = -0,035$  мм; длина рычага-увеличителя  $L = 60$  мм;  $K_y = 5,25$  — коэффициент увеличения рычага (при  $a = 0$ ).

При этих характеристиках  $A = -6$  МПа/мм,  $\sigma_b = 63$  МПа.



В процессе электрохимического травления с поверхности полукольцевой канавки был снят слой  $a = 0,3$  мм.

На рис. 9 приведен график перемещений рычага-увеличителя в процессе травления поверхностного слоя радиусной канавки, эпюры тангенциальных остаточных напряжений, а также эпюры осевых и тангенциальных остаточных напряжений в поверхностном слое впадин резьбы на шпильке, рассчитанные по формулам плоского напряженного состояния. Сравнение этих эпюр с эпюрами остаточных напряжений в вырезанных образцах показывает, что остаточные напряжения в образцах (без учета плоского напряженного состояния) могут существенно отличаться от остаточных напряжений в детали. Так, в приведенном выше примере на поверхности ( $a = 0$ ) вырезанного образца остаточные напряжения растяжения составили 70 МПа, а на поверхности впадин резьбы на шпильке — 29 МПа.

Выполненные исследования показали, что разработанная методика определения остаточных напряжений в канавках крупных резьбовых соединений позволяет определять характер, величину и глубину проникновения зоны ОН после различных методов механической обработки. Это могут быть ОН как сжатия, так и растяжения. Но они достигают таких величин, которые необходимо учитывать при расчетах на прочность высоконагруженных резьбовых соединений различных изделий машиностроения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. — М.: Машгиз, 1963. — 232 с.
2. Овseenко А. Н., Клауч Д. Н., Кушева М. Е. Технологическое обеспечение качества изделий машиностроения. — М.: МГТУ «Станкин», 2006. — 56 с.
3. Овseenко А. Н., Шур Д. М. Определение осевых остаточных напряжений в цилиндрических деталях методом продольного разреза / Проблемы прочности. 1976. № 18. С. 1505 – 1508.
4. Подзей А. В., Сулима А. М., Евстигнеев М. И., Серебrennikov Г. З. Технологические остаточные напряжения. — М.: Машиностроение, 1973. — 216 с.
5. Иванов С. И., Павлов В. Ф., Коновалов Г. В., Минин Б. В. Технологические остаточные напряжения и сопротивление усталости авиационных резьбовых деталей. — М.: МАП. Отраслевая библиотека «Технический прогресс и повышение квалификации», 1992. — 192 с.

## REFERENCES

1. Birger I. A. Residual stresses. — Moscow: Mashgiz, 1963. — 232 p. [in Russian].
2. Ovseenko A. N., Klauch D. N., Kushcheva M. E. Technological maintenance of quality engineering products. — Moscow: Izd. MGTU «Stankin», 2006. — 56 p. [in Russian].
3. Ovseenko A. N., Shur D. M. Determination of residual stresses in the axial cylindrical parts by a longitudinal cut / Probl. Prochn. 1976. N 18. P. 1505 – 1508 [in Russian].
4. Podzei A. V., Sulima A. M., Evstigneev M. I., Serebrennikov G. Z. Technological residual stresses. — Moscow: Mashinostroenie, 1973. — 216 p. [in Russian].
5. Ivanov S. I., Pavlov V. F., Kononov G. V., Minin B. V. Technological residual stresses and fatigue strength of air threaded parts. — Moscow: MAP. Otrasleyaya biblioteka «Tekhnicheskii progress i povyshenie kvalifikatsii», 1992. — 192 p. [in Russian].