

УДК 621.88.084:539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЯ «ПЛАСТИНА–КОЛЬЦО» ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СОЕДИНЕНИЯ И ОДНООСНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. С. ЖЕРНАКОВ<sup>1</sup>, Т. Н. МАРДИМАСОВА<sup>2</sup>, В. Р. АКБАШЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>zhvs@mail.rb.ru, <sup>2</sup>toma\_mard@mail.ru, <sup>3</sup>vadja92@mail.ru

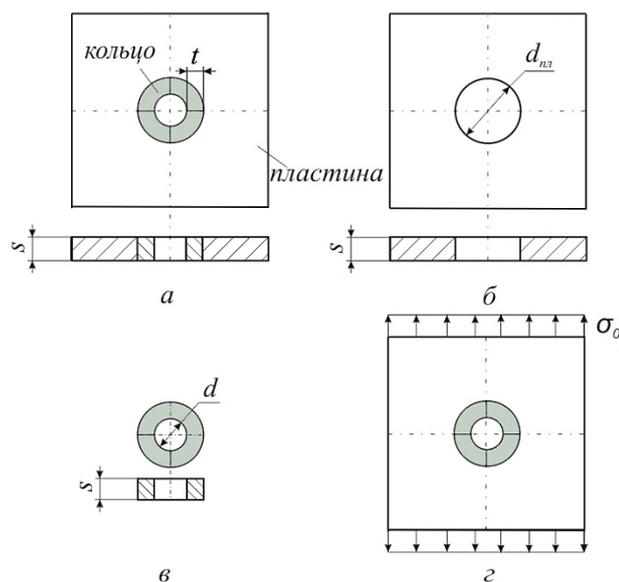
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 20 января 2015

**Аннотация.** Выполнено математическое моделирование процесса посадки с натягом кольца в пластину, выполненных из наноструктурного и чистого титанового сплава ВТ6 соответственно. Получены поля распределения технологических напряжений при формировании соединения. Исследовано влияние радиуса кольца и толщины конструкции на характер распределения напряжений при одноосном растяжении.

**Ключевые слова:** посадка с натягом; технологические напряжения; наноструктурный титановый сплав ВТ6.

Соединение «пластина–кольцо» получают путем механической запрессовки с помощью нагрева охватывающей или охлаждения охватываемой детали, а также путем гидрораспора. Эти высоконадежные соединения позволяют передавать значительные осевые усилия и крутящие моменты [1].



**Рис. 1.** Соединение с натягом «пластина–кольцо» (а), пластина (б), кольцо (в), одноосное растяжение соединения (г)

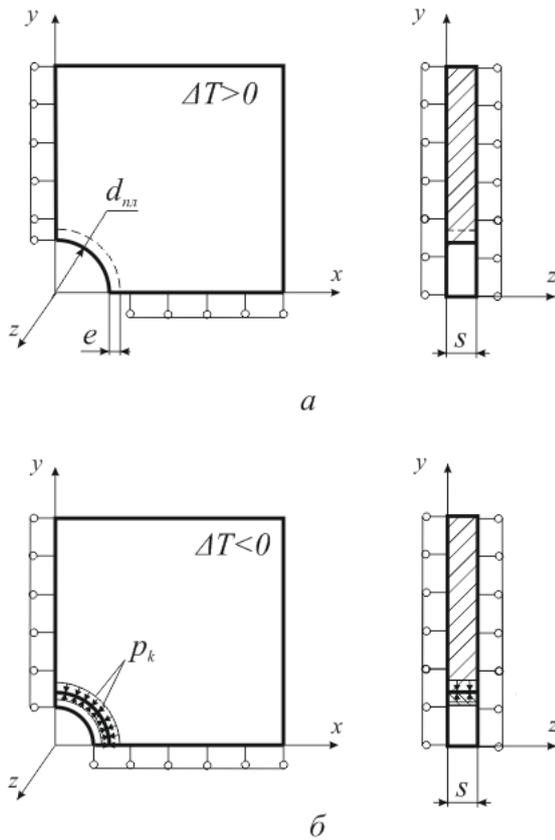
В данной работе рассмотрены задачи математического моделирования получения соединения «пластина–кольцо» и последующего осевого нагружения (рис. 1), а также исследования полученного напряженно-деформированного состояния.

Исследованы пластины, ослабленные отверстием диаметром  $d_{пл} = (14...30)$  мм, с запрессованными в них кольцами толщиной  $t = (2...10)$  мм;  $d = 10$  мм – внутренний диаметр кольца;  $s = (5...15)$  мм – высота кольца и пластины. Материал пластины – обычный титановый сплав ВТ6 (предел текучести  $\sigma_T^{пл} = 830$  МПа, коэффициент линейного расширения  $\gamma = 8,6 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ ), а кольца – наноструктурный сплав ВТ6 с пределом текучести  $\sigma_T^{кол} = 1250$  МПа. В силу геометрической и силовой симметрии относительно осей  $X$  и  $Y$  в качестве расчетной схемы соединения была принята часть (рис. 2).

Численное моделирование технологического процесса соединения с натягом рассмотрено в виде двух этапов.

На первом этапе происходил нагрев пластины, обеспечивающий зазор размером  $e$  между пластиной и кольцом, достаточный для дальнейшей посадки кольца в отверстие пластины.

Сплошными линиями на рис. 2, а показан исходный контур  $1/4$  части пластины до нагрева, а штриховыми – после нагрева.



**Рис. 2.** Схема технологического получения соединения: *а* – нагрев пластины; *б* – охлаждение пластины и образование соединения

На втором этапе процесса выполнялась установка кольца в отверстие пластины диаметром  $d_{пл}^* = d_{пл} + 2e$ , причем  $d_k < d_{пл}^*$  (рис. 1, в), и охлаждение пластины на величину  $\Delta T$ .

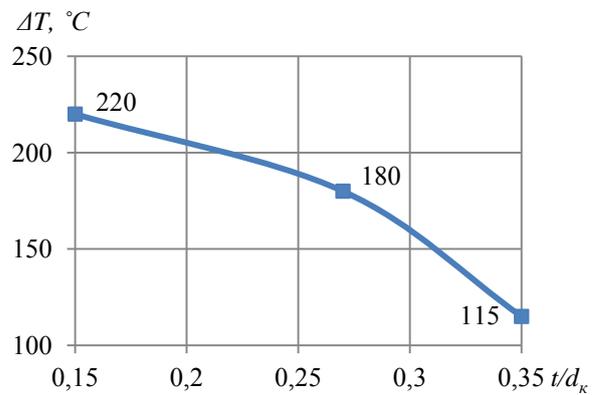
При охлаждении возникало контактное давление  $p_k$  между пластиной и кольцом (рис. 2, б) и формировалось соединение (см. рис. 1, а), что и приводило к возникновению напряженно-деформированного состояния в деталях.

Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов [2] в трехмерной постановке с применением программно-вычислительного комплекса ANSYS 14.5.

Величина зазора  $e$  зависит от допуска на размер внешнего диаметра кольца  $d_k$  (посадка с гарантированным натягом Н7/п7) [3]. В связи с этим определена оптимальная величина нагрева  $\Delta T$  для посадочного диаметра  $d_k$ . Была получена зависимость величины нагрева  $\Delta T$  от отношения  $t/d_k$ .

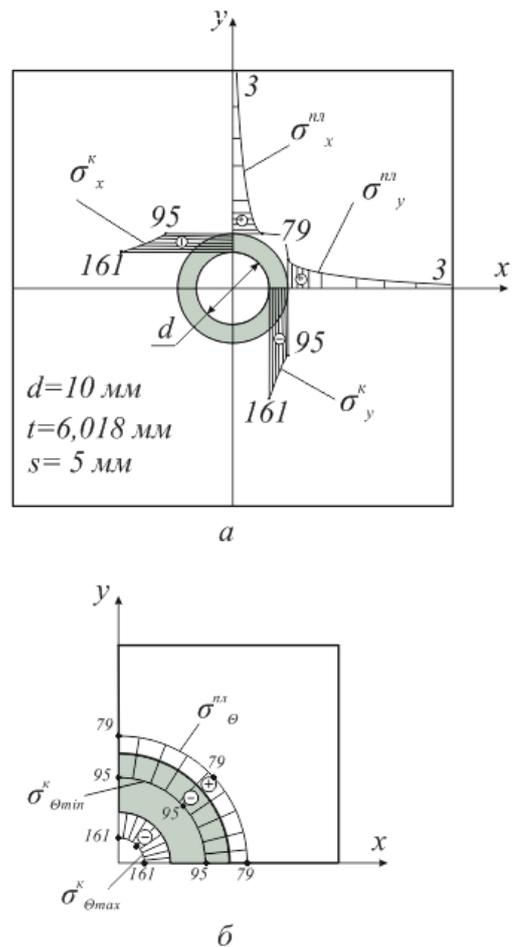
В результате исследования получены поля распределения технологических напряжений и деформаций при получении соединения. В качестве примера на рис. 4 приведены эпюры распределения осевых  $\sigma_{y,пл}^{пл}$ ,  $\sigma_{x,пл}^{пл}$ ,  $\sigma_{y,к}^{к}$ ,  $\sigma_{x,к}^{к}$  и контурных

$\sigma_{\theta,к}^{к}$ ,  $\sigma_{\theta,пл}^{пл}$  напряжений по осям  $X$  и  $Y$  в пластине и кольце соответственно, возникающих при запрессовке кольца толщиной  $t = 6,018$  мм [3], высоте  $s = 5$  мм.



**Рис. 3.** Зависимость величины  $\Delta T$  от отношения  $t/d_k$

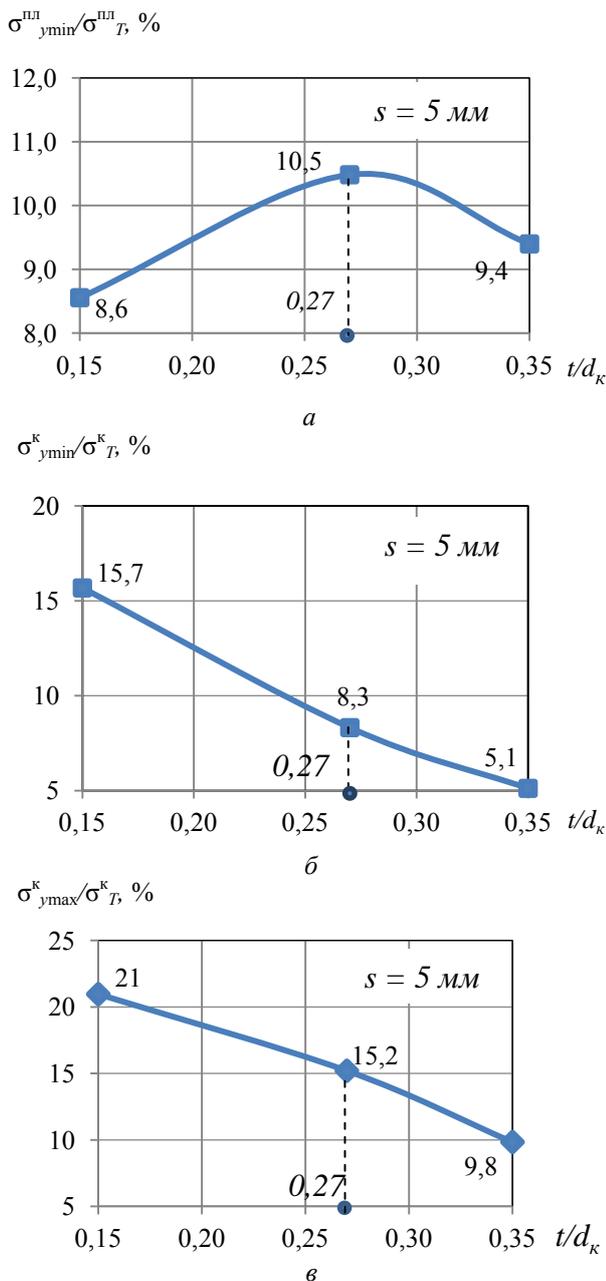
На рис. 4, а видно, что по толщине соединения распределение осевых напряжений неравномерно, причем в кольце возникают сжимающие, а в пластине – растягивающие напряжения.



**Рис. 4.** Поля распределения технологических напряжений при натяге: *а* – осевых  $\sigma_x, \sigma_y$ ; *б* – контурных  $\sigma_\theta$

Максимальные напряжения  $\sigma_{y\max}^k$  в кольце наблюдаются на внутренней свободной поверхности и достигают значения 161 МПа. При этом минимальные сжимающие напряжения  $\sigma_{y\min}^k$  в кольце равны 95 МПа и возникают в зоне контакта кольца с пластиной. Максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_{y\max}^{пл} = 79$  МПа возникают в зоне контакта. По мере удаления от поверхности контакта в глубь пластины значение растягивающих напряжений снижается практически до нуля.

На рис. 4, б приведена картина распределения контурных  $\sigma_{\theta}$  напряжений [4] в соединении.



**Рис. 5.** Зависимость относительных осевых напряжений при натяге от параметров соединения  $t/d_k$  при толщине соединения  $s = 5$  мм

В кольце возникают сжимающие напряжения, а в пластине – растягивающие. Причем распределение этих напряжений равномерно по контуру деталей. Наиболее напряженным местом является свободная внутренняя поверхность охватываемой детали [1] и максимальные напряжения сжатия  $\sigma_{y\max}^k = 161$  МПа. В зоне контакта растягивающие напряжения в пластине  $\sigma_y^{пл} = 79$  МПа, сжимающие напряжения  $\sigma_{y\min}^k = 95$  МПа.

В результате исследований были получены зависимости относительного напряжения в пластине  $\sigma_y^{пл}/\sigma_T^{пл}$  (рис. 5, а) и кольца  $\sigma_{y\min}^k/\sigma_T^k$  (рис. 5, б),  $\sigma_{y\max}^k/\sigma_T^k$  (рис. 5, в) от отношения толщины кольца  $t$  к внешнему диаметру кольца  $d_k$ .

Установлено, что относительные напряжения  $\sigma_y^{пл}/\sigma_T^{пл}$  достигают своего максимума при  $t/d_k$  равным 0,27 и принимают значение 10,5 % (рис. 5, а). При дальнейшем увеличении толщины кольца  $t$  значение относительных напряжений снижается до 9,4 %. С увеличением толщины кольца относительные напряжения  $\sigma_{y\min}^k/\sigma_T^k$  и  $\sigma_{y\max}^k/\sigma_T^k$  снижаются с 15,7 % до 5,1 % и с 21 % до 9,8 % соответственно (рис. 5, б, в).

В табл. 1–3 представлены результаты расчета относительных напряжений при разных величинах высоты соединения  $s$ .

Следует отметить, что характер относительных напряжений не меняется при изменении высоты соединения  $s$ .

Таблица 1

Относительные напряжения $\sigma_y^{пл}/\sigma_T^{пл}$ , %			
$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
	5	10	15
0,15	8,6	8,4	8,3
0,27	10,5	10,7	11,0
0,35	9,4	9,5	9,5

Таблица 2

Относительные напряжения $\sigma_{y\min}^k/\sigma_T^k$ , %			
$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
	5	10	15
0,15	15,7	15,6	15,4
0,27	8,3	8,8	8,6
0,35	5,1	5,0	5,0

Таблица 3

Относительные напряжения $\sigma_{у\max}^k / \sigma_{T,}^k$ , %			
$t/d_k$	Высота соединения $s$ , мм		
	5	10	15
0,15	21,0	20,8	20,6
0,27	15,2	14,9	14,6
0,35	9,8	9,8	9,7

На рис. 6 изображена зависимость контактного давления  $p_k$  от геометрических параметров. При изменении  $t/d_k$  от 0,15 до 0,27 величина давления  $p_k$  растет. Выявлено, что максимальное значение контактного давления  $p_k = 74$  МПа достигается при отношении  $t/d_k$  равном 0,27 и  $s = 5$  мм. Дальнейшее увеличение толщины кольца приводит к снижению контактного давления  $p_k$  до 55 МПа. При увеличении высоты соединения  $s$  от 5 мм до 15 мм значение давления изменяется незначительно. Например, при отношении  $t/d_k = 0,27$  контактное давление снижается с 74 до 71 МПа.

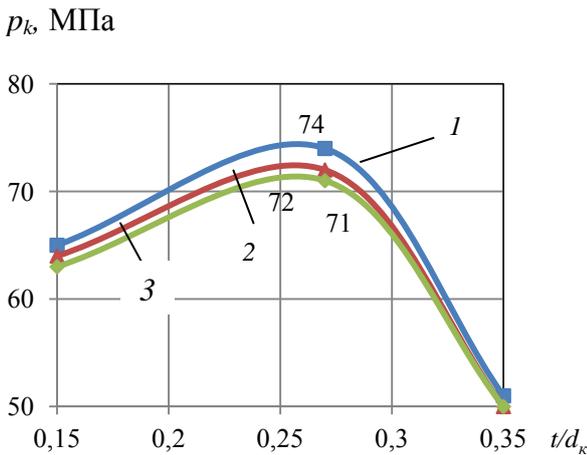


Рис. 6. Контактное давление:  
1 –  $s = 5$  мм; 2 –  $s = 10$  мм; 3 –  $s = 15$  мм

Кроме того, полученное соединение с натягом подвергалось одноосному растяжению (рис. 7).

Выявлено, что в зависимости от геометрических характеристик, соединение способно выдержать критическое значение приложенной нагрузки  $\sigma_0 - \sigma_{кр}$ . При превышении значения  $\sigma_{кр}$  происходит нарушение контакта в точке 1 (рис. 7).

Установлено, что изменение высоты соединения  $s$  незначительно влияет на характер изменения критического напряжения  $\sigma_{кр}$ , однако влияет на его уровень (рис. 8).

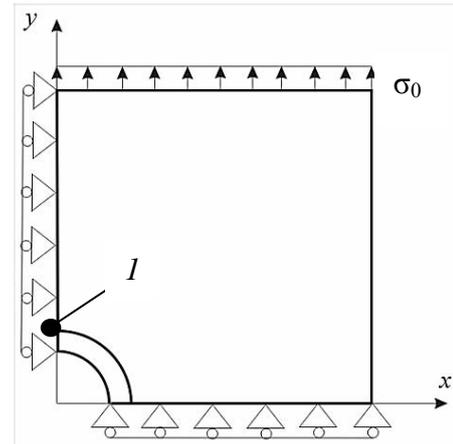


Рис. 7. Расчетная схема одноосного растяжения соединения с натягом

Так в соединении с отношением  $t/d_k$ , равным 0,15, при увеличении высоты соединения  $s$  значение критического напряжения снижается с 235 до 190 МПа. При увеличении толщины кольца  $t$  значение критического напряжения также снижается в пределах от 18,4 до 23,4 %.

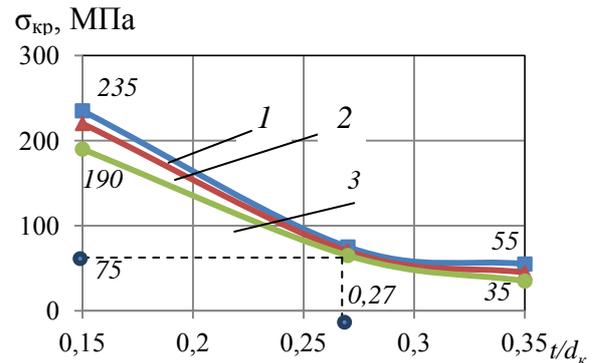
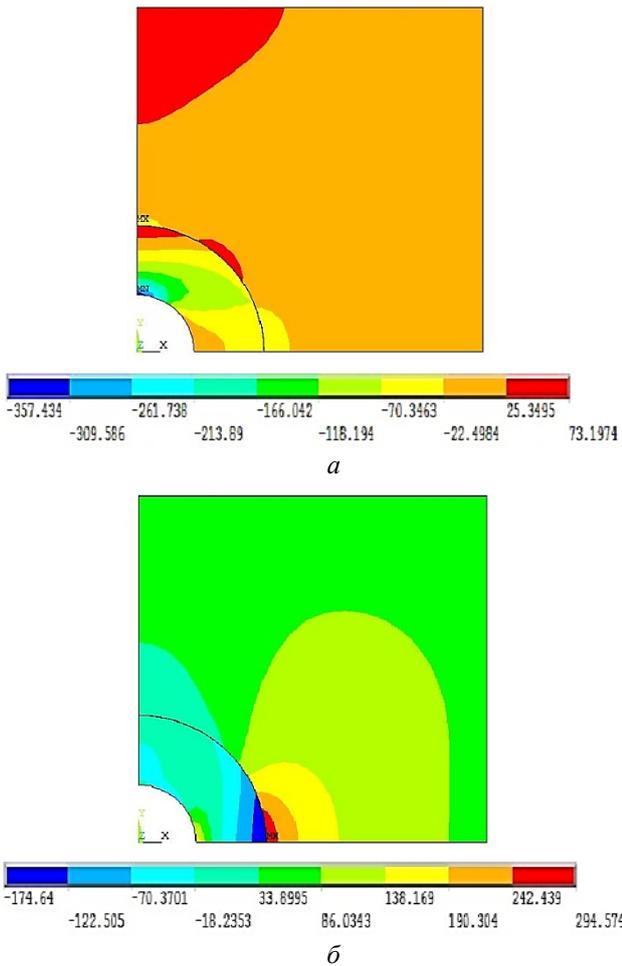


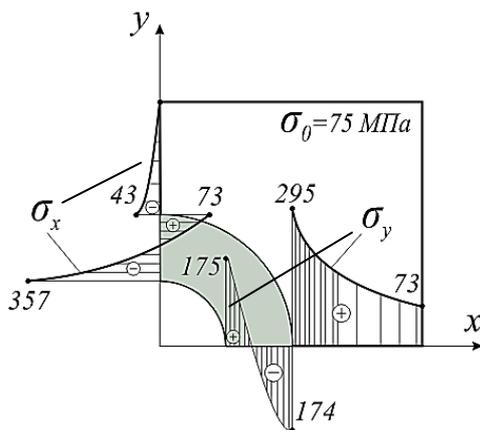
Рис. 8. Значение критического растягивающего напряжения  $\sigma_{кр}$ :  
1 –  $s = 5$  мм; 2 –  $s = 10$  мм; 3 –  $s = 15$  мм

На рис. 9 в качестве примера представлено распределение полей осевых напряжений  $\sigma_x, \sigma_y$  в пластине высотой  $s = 5$  мм, толщиной кольца  $t = 6,018$  мм и  $d_k = 22$  мм при растяжении нагрузкой  $\sigma_0 = 75$  МПа.

На внутренней поверхности кольца формируются растягивающие  $\sigma_y$  и сжимающие напряжения  $\sigma_x$ , максимум которых равен 175 и 357 МПа соответственно. На внешней поверхности кольца возникают сжимающие  $\sigma_y$  и растягивающие  $\sigma_x$ , максимальные значения которых достигают 174 и 73 МПа. В пластине формируются растягивающие напряжения  $\sigma_y = 295$  МПа и сжимающие  $\sigma_x = 43$  МПа (рис. 10).



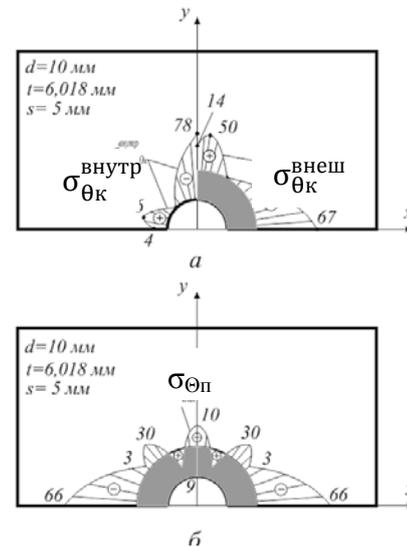
**Рис. 9.** Поля распределения осевых напряжений: *а* – напряжения  $\sigma_x$ , *б* – напряжения  $\sigma_y$



**Рис. 10.** Распределение полей осевых напряжений при растяжении

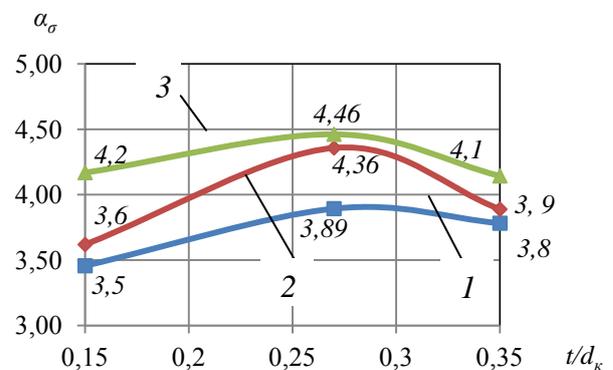
Следует отметить, что распределение контурных напряжений в пластине  $\sigma_{\text{пл}}$ , на внешней  $\sigma_{\text{внеш}}^{\text{вн}}_{\theta\kappa}$  и внутренней поверхности кольца  $\sigma_{\text{внутр}}^{\text{вн}}_{\theta\kappa}$  неравномерно (рис. 11). Значение максимальных сжимающих напряжений на внешней поверхности кольца равно 67 МПа, а растягивающих 50 МПа. На внутренней поверхности коль-

ца величина сжимающих напряжений достигает значения 78 МПа, а растягивающих 6 МПа. Максимальные сжимающие напряжения в кольце равны 66 МПа, а сжимающих 9 МПа.



**Рис. 11.** Распределение контурных напряжений: *а* – в кольце; *б* – в пластине

На рис. 12 изображен график зависимости коэффициента концентрации напряжения  $\alpha_\sigma = \sigma_{\text{max}}/\sigma_0$  от отношения  $t/d_\kappa$  при высоте соединения  $s$  равной 5 мм (кривая 1), 10 мм (кривая 2), 15 мм (кривая 3).



**Рис. 12.** Коэффициент концентрации напряжения в пластине:  
1 –  $s = 5$  мм; 2 –  $s = 10$  мм; 3 –  $s = 15$  мм

При увеличении отношения  $t/d_\kappa$  от 0,15 до 0,27 значение коэффициента концентрации напряжения  $\alpha_\sigma$  увеличивается. Так, например, при высоте соединения  $s = 10$  мм коэффициент концентрации повышается с 3,6 до 4,36. Дальнейшее увеличение отношения  $t/d_\kappa$  ведет к снижению коэффициента концентрации.

## ВЫВОДЫ

- Получена зависимость оптимальной величины нагрева  $\Delta T$ . Установлено, что величина нагрева снижается при увеличении отношения  $t/d_k$ .
- Выявлено, что наиболее напряженным местом является внутренняя свободная поверхность кольца.
- Установлено, что при увеличении отношения  $t/d_k$ , значения относительных напряжений в кольце снижаются. В пластине относительные напряжения растут при  $t/d_k = (0,15-0,27)$  от 8,6 до 10,5 %, после чего наблюдается снижение. Отмечено, что варьирование высоты соединения не влияет на характер распределения относительных напряжений.
- Определено, что величина контактного давления увеличивается до  $p_k = 74$  МПа при  $t/d_k = 0,27$ . Дальнейшее увеличение отношения приводит к значительному снижению контактного давления.
- Получена зависимость критического напряжения  $\sigma_{кр}$  от геометрических характеристик соединения. Выявлено, что с увеличением отношения  $t/d_k$  происходит снижение критического напряжения до 23,4 %.
- Установлена зависимость коэффициента концентрации  $\alpha_\sigma$ . При достижении отношения  $t/d_k = 0,27$  коэффициент концентрации увеличивается, после чего наблюдается снижение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречищев Е. С., Ильяшенко А. А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с. [[ Е. С. Grechishev, А. А. Ilyashenko, *Interference fit: Calculations, design, manufacture*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1981. ]]
2. Зенкевич О. С. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1975. 540 с. [[ О. S. Zenkevich, *Finite element method*, (in Russian). Moscow: Mir, 1975. ]]
3. Допуски и посадки: справочник. В 2 ч. / В. Д. Мягков, М. А. Палей. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. [[ V. D. Myagkov, M. A. Palei, *Tolerance and fit: Manual*, (in Russian). Leningrad: Mashinostroenie, 1982. ]]
4. Жернаков В. С. Сопротивление материалов – механика материалов и конструкций. Уфа: УГАТУ, 2012. 494 с. [[ V. S. Zhernakov, *Strength of materials – Mechanics of materials and structures*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012. ]]

## ОБ АВТОРАХ

**ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич**, зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук (УАИ, 1992), проф., засл. деят. науки РФ, чл.-кор. АН РБ. Иссл. в обл. фундамент. и прикл. задач теории упругости, пластичности, ползучести и мех. разрушения применительно к элементам авиационных конструкций.

**МАРДИМАСОВА Тамара Николаевна**, доц. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж. (УАИ, 1971). Канд. техн. наук (УАИ, 1984). Иссл. в обл. задач мех. процессов упруго-вязкого пластического деформирования конструкций.

**АКБАШЕВ Вадим Ринатович**, м-т каф. авиац. двиг. Б-р техн. и технол. (УГАТУ, 2013). Готовит дис. о влиянии технол. напряжений на экспл. характеристики.

## METADATA

**Title:** Modeling technology stresses in connection «plate-ring».

**Authors:** V. S. Zhernakov, T. N. Mardimasova, V. R. Akbashev.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** vадja92@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp. 14-19, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Mathematical modeling of the interference fit of the ring into the plate made of pure titanium and nanostructural alloy VT6 respectively. The fields of technological stress distribution in the formation of compounds. The influence of the ring radius and thickness of the structure on the character of the stress distribution under uniaxial tension.

**Key words:** Interference fit; technological stresses; nanostructure titanium alloy VT6.

**About authors:**

**ZHERNAKOV, Vladimir Sergeyevich**, Head of the Department of Strength of Materials, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation. Corresponding Member of the Academy of Sciences of RB.

**MARDIMASOVA, Tamara Nikolaevna**, Candidate of Technical Sciences., associate professor.

**AKBASHEV, Vadim Rinatovich**, Undergraduate, Chair aviation engines, Bachelor of Engineering and Technology (USATU, 2013).