

УДК 539.3:669.295

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ ПРИ ЧИСТОМ СДВИГЕ И ДВУХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В. С. ЖЕРНАКОВ¹, Т. Н. МАРДИМАСОВА², В. Р. АКБАШЕВ³, К. В. КОНЕВА⁴

¹ zhvs@mail.rb.ru, ² toma_mard@mail.ru, ³ vадja92@mail.ru, ⁴ ksyu.koneva.95@mail.ru

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

Поступила в редакцию 15.06.2016

Аннотация. Выполнен численный расчет напряженно-деформированного состояния соединения с натягом «пластина-кольцо», выполненного из наноструктурного и чистого титанового сплава ВТ6. Получены поля рас-пределения напряжений в условии чистого сдвига и двухосного растяжения с учетом технологических напряжений. Исследовано влияние радиуса кольца и толщины конструкции на характер распределения напряжений.

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

Соединение с натягом получают путем механической запрессовки с помощью нагрева охватывающей или охлаждения охватываемой детали, а также путем гидрораспора. Эти высоконадежные соединения позволяют передавать значительные осевые силы и крутящие моменты [1].

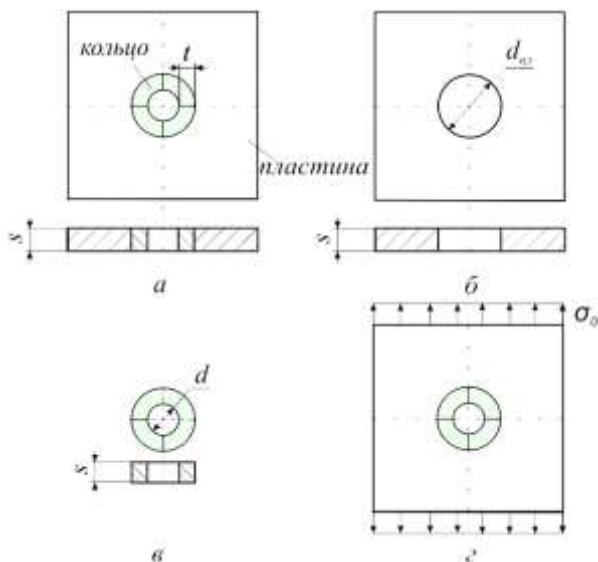


Рис. 1. Соединение с натягом «пластина-кольцо» (а), пластина (б), кольцо (в), одноосное растяжение соединения (г)

В данной работе рассмотрены задачи математического моделирования получения соединения с натягом «пластина-кольцо» и последую-

ющего 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 $\alpha_T = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 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 $1/4$ 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.

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 ΔT .

При охлаждении возникало контактное давление p_k между пластиной и кольцом (рис. 2, б)

и формировалось соединение (рис. 1, а), что и приводило к возникновению напряженно-деформированного состояния в деталях.

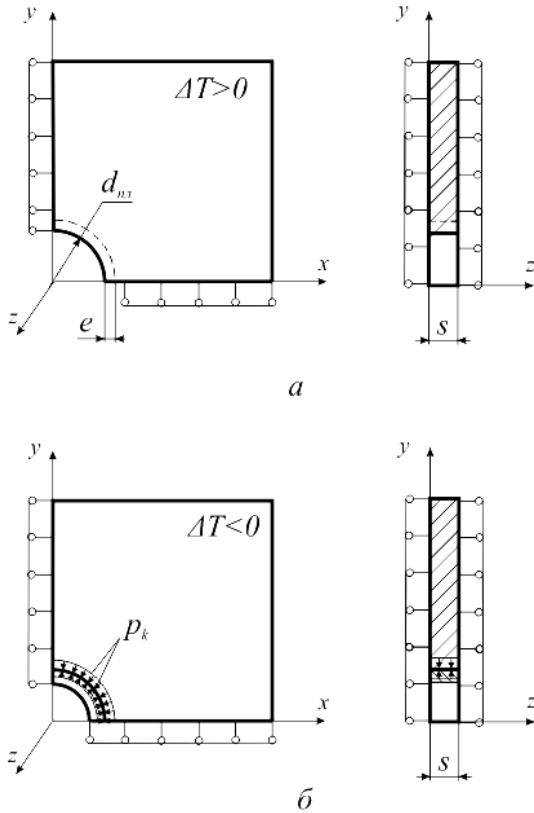


Рис. 2. Схема технологического получения соединения: а – нагрев пластины; б – охлаждение пластины и образование соединения

Численное решение задачи выполнено методом конечных элементов [3] 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/p7) [2]. В связи с этим определена оптимальная величина нагрева ΔT для посадочного диаметра d_k . Была получена зависимость величины нагрева ΔT от отношения t/d_k .

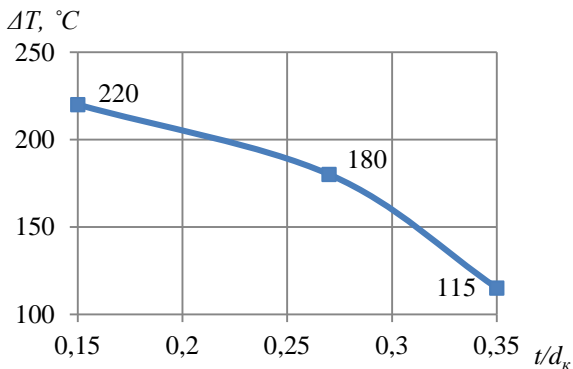


Рис. 3. Зависимость величины ΔT от отношения t/d_k

В результате исследования получены поля распределения технологических напряжений и деформаций при получении соединения. В качестве примера, на рис. 4 приведены эпюры распределения осевых σ_y^{nl} , σ_x^{nl} , σ_y^k , σ_x^k и контурных σ_{θ}^{nl} , σ_{θ}^k напряжений по осям X и Y в пластине и кольце соответственно, возникающих при запрессовке кольца толщиной $t = 6,018$ мм [2] и высоте $s = 5$ мм.

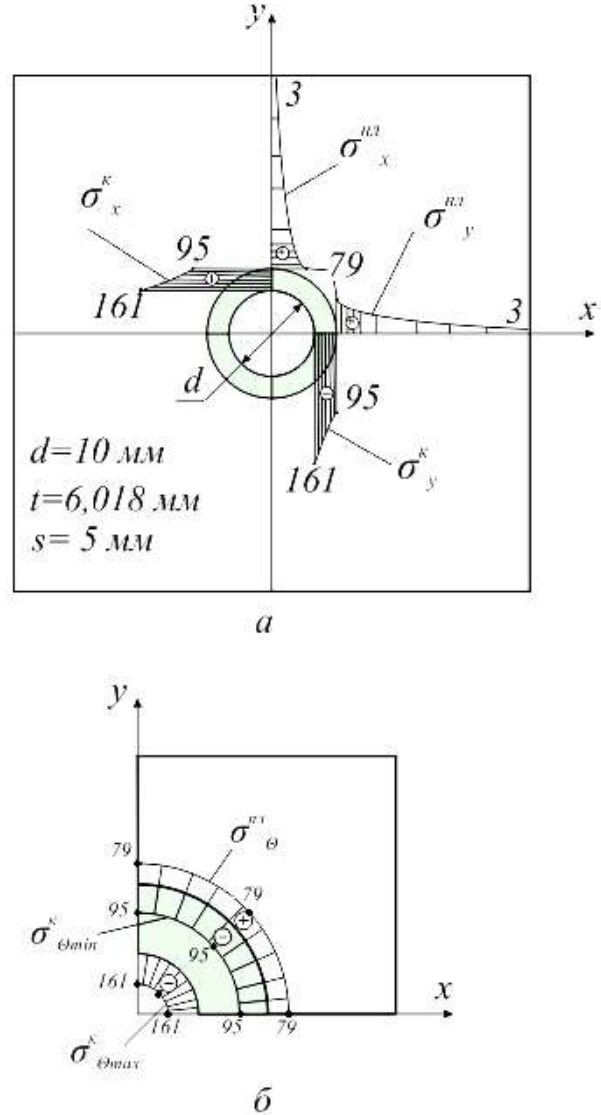


Рис. 4. Поля распределения технологических напряжений при натяге: а – осевых σ_x, σ_y ; б – контурных σ_{θ}

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

тягивающие напряжения $\sigma_{y\max}^{пл} = 79$ МПа возникают в зоне контакта. По мере удаления от поверхности контакта вглубь пластины, значение растягивающих напряжений снижается практически до 0 МПа.

На рис. 4, б приведена картина распределения контурных σ_{θ} напряжений [4] в соединении. 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 $\sigma_{\theta\max}^к = 161$ МПа. В зоне контакта растягивающие напряжения в пластине $\sigma_{\theta}^{пл} = 79$ МПа, сжимающие напряжения $\sigma_{\theta\min}^к = 95$ МПа.

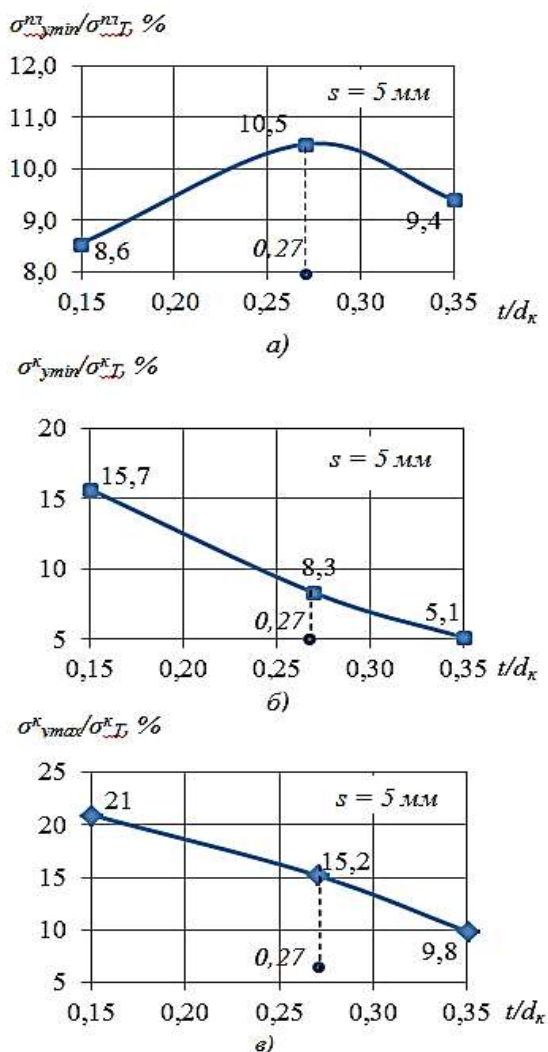


Рис. 5. Зависимость относительных осевых напряжений при натяге от параметров соединения t/d_k при толщине соединения $s = 5$ мм

В результате исследований были получены зависимости относительного напряжения в пла-

стине $\sigma_y^{пл}/\sigma_T^{пл}$ (рис. 5, а) и кольце $\sigma_{y\min}^к/\sigma_T^к$ (рис. 5, б), $\sigma_{y\max}^к/\sigma_T^к$ (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 $\sigma_{y\min}^к/\sigma_T^к$ и $\sigma_{y\max}^к/\sigma_T^к$ 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 .

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 $\sigma_{y\min}^к/\sigma_T^к$, %			
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 $\sigma_{y\max}^к/\sigma_T^к$, %			
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

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

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 МПа до 71 МПа.

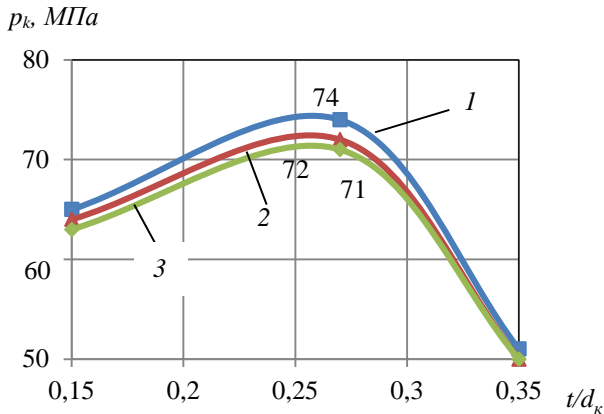


Рис. 6. Контактное давление:
1 – $s = 5$ мм; 2 – $s = 10$ мм; 3 – $s = 15$ мм

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

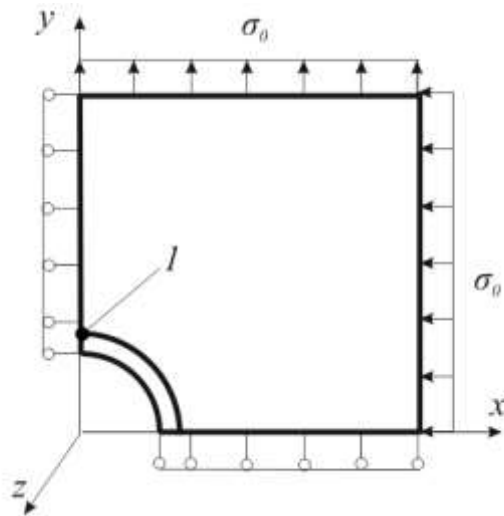


Рис. 7. Расчетная схема соединения при чистом сдвиге

В результате исследования получена зависимость критического напряжения $\sigma_{кр}$ от геометрических характеристик соединения. На рис. 8 видно, что при изменении высоты соединения уровень максимальной нагрузки $\sigma_{кр}$ снижается незначительно. Однако при изменении отношения t/d_k от 0,15 до 0,35 предельная нагрузка снижается на 30%.

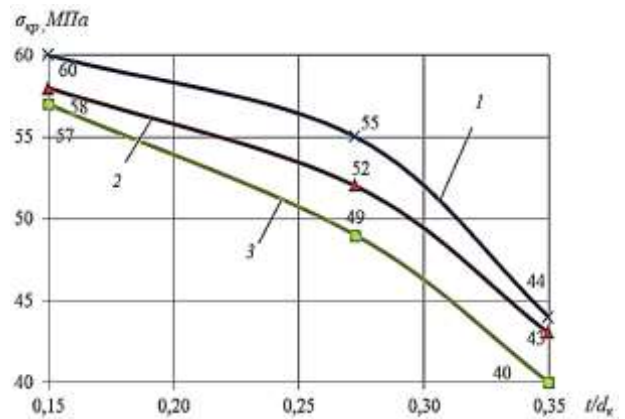


Рис. 8. Зависимость нагрузки $\sigma_{кр}$ от отношения t/d_k : 1 – $s = 5$ мм; 2 – $s = 10$ мм; 3 – $s = 15$ мм

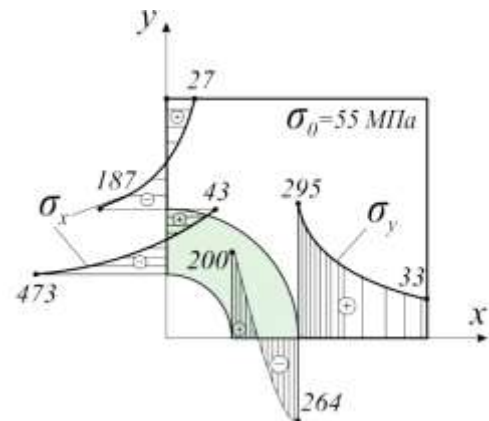


Рис. 9. Распределение полей напряжений в соединении при чистом сдвиге

На внутренней поверхности кольца формируются растягивающие σ_y и сжимающие напряжения σ_x , максимум которых равен 200 МПа и 473 МПа соответственно (рис. 9). На внешней поверхности кольца возникают сжимающие σ_y и растягивающие σ_x , максимальные значения которых достигают 264 МПа и 43 МПа. В пластине формируются растягивающие напряжения $\sigma_y = 295$ МПа и сжимающие $\sigma_x = 187$ МПа.

В результате исследований были получены зависимости относительного напряжения на внутренней поверхности кольца $\sigma_{y \text{ вн}}^k / \sigma_T^k$, $\sigma_{x \text{ вн}}^k / \sigma_T^k$, внешней поверхности кольца $\sigma_{y \text{ внеш}}^k / \sigma_T^k$, $\sigma_{x \text{ внеш}}^k / \sigma_T^k$ и в пластине $\sigma_{y \text{ пл}}^{\text{пл}} / \sigma_T^{\text{пл}}$, $\sigma_{x \text{ пл}}^{\text{пл}} / \sigma_T^{\text{пл}}$ от отношения толщины кольца t к внешнему диаметру кольца d_k . Отрицательные значения относительных напряжений означают наличие сжимающих напряжений.

В табл. 4–6 представлены результаты расчета относительных напряжений при разных величинах высоты соединения s .

Таблица 4

Относительные напряжения $\sigma_{y_{вн}}^k / \sigma_{T}^k$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	-4,2	-3,8	-6,3
0,27	16,4	16,0	10,2
0,35	19,0	18,9	16,0

Таблица 5

Относительные напряжения $\sigma_{y_{min}}^k / \sigma_{T}^k$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	-24,5	-24,2	-24,0
0,27	-21,6	-21,3	-20,5
0,35	-16,4	-15,2	-15,0

Таблица 6

Относительные напряжения $\sigma_{y_{н}}^{нз} / \sigma_{T}^{нз}$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	41,6	40,5	39,8
0,27	38,0	37,3	34,9
0,35	31,3	29,2	28,7

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

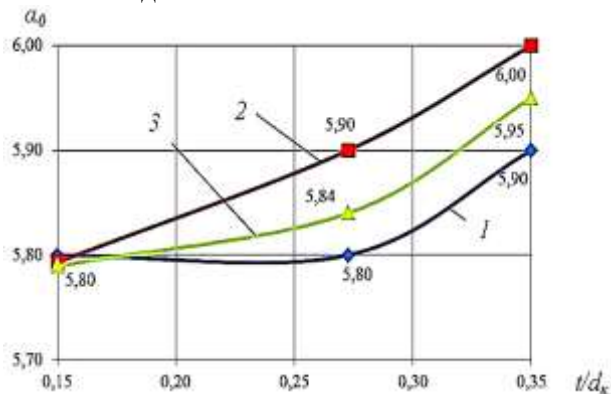


Рис. 10. Коэффициент концентрации напряжений в пластине при чистом изгибе: 1 – $s=5$ мм; 2 – $s=10$ мм; 3 – $s=15$ мм

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

При увеличении отношения t/d_k от 0,15 до 0,35 значение коэффициента концентрации напряжения α_σ увеличивается.

Так, например, при высоте соединения $s=10$ мм наблюдается наиболее интенсивный рост коэффициента концентрации и значения изменяются с 5,8 до 6,0.

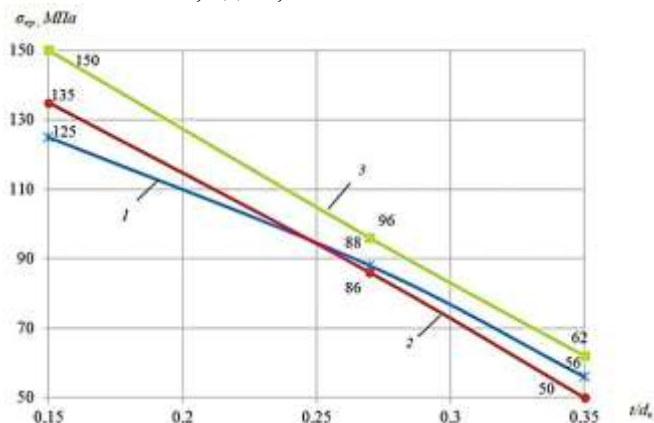


Рис. 11. Влияние геометрических параметров соединения на величину $\sigma_{кр}$: 1 – $s=5$ мм; 2 – $s=10$ мм; 3 – $s=15$ мм

Рассмотрена задача двухосного растяжения соединения напряжениями $\sigma_y = 2\sigma_x$, что соответствует напряженному состоянию стенок сосудов.

В результате исследования получена зависимость критического напряжения $\sigma_{кр}$ от геометрических параметров соединения.

Из рис. 11 можно установить, что при изменении высоты соединения s с 5 до 15 мм уровень максимальной нагрузки $\sigma_{кр}$ увеличивается на 16,7 %. При изменении отношения t/d_k от 0,15 до 0,35 наблюдается снижение критической нагрузки $\sigma_{кр}$. Так, например, в соединении с высотой $s = 10$ мм происходит наиболее интенсивный спад величины $\sigma_{кр}$ – практически на 63%.

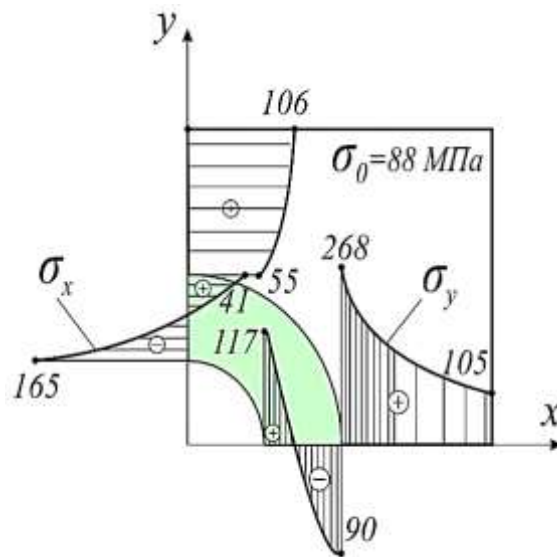


Рис. 12. Распределение полей осевых напряжений при двухосном растяжении

На внутренней поверхности кольца формируются растягивающие σ_y и сжимающие напряжения σ_x , максимум которых равен 117 МПа и 165 МПа соответственно (рис. 12). На внешней поверхности кольца возникают сжимающие σ_y и растягивающие σ_x , максимальные значения которых достигают 90 МПа и 41 МПа. В пластине формируются растягивающие напряжения $\sigma_y = 268$ МПа и $\sigma_x = 106$ МПа.

В результате исследований были получены зависимости относительного напряжения на внутренней поверхности кольца $\sigma_{y \text{ вн}}^k / \sigma_T^k$, $\sigma_{x \text{ вн}}^k / \sigma_T^k$, внешней поверхности кольца $\sigma_{y \text{ внеш}}^k / \sigma_T^k$, $\sigma_{x \text{ внеш}}^k / \sigma_T^k$ и в пластине $\sigma_{y \text{ пл}}^k / \sigma_T^k$, $\sigma_{x \text{ пл}}^k / \sigma_T^k$ от отношения толщины кольца t к внешнему диаметру кольца d_k .

В табл. 7–9 представлены результаты расчета относительных напряжений при разных величинах высоты соединения s .

Таблица 7

Относительные напряжения $\sigma_{y \text{ вн}}^k / \sigma_T^k$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	3,0	4,8	5,4
0,27	9,4	7,1	10,2
0,35	11,4	9,8	11,7

Таблица 8

Относительные напряжения $\sigma_{y \text{ мин}}^k / \sigma_T^k$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	-8,5	-8,0	-8,9
0,27	-7,2	-7,2	-8,2
0,35	-5,0	-5,0	-5,0

Таблица 9

Относительные напряжения $\sigma_{y \text{ пл}}^k / \sigma_T^k$, %			
t/d_k	Высота соединения s , мм		
	5	10	15
0,15	41,4	44,3	49,4
0,27	32,3	31,9	36,1
0,35	23,6	20,7	23,6

Установлено, что при увеличении отношения t/d_k значения относительных напряжений в кольце снижаются. Отмечено, что варьирование высоты соединения не влияет на характер распределения относительных напряжений.

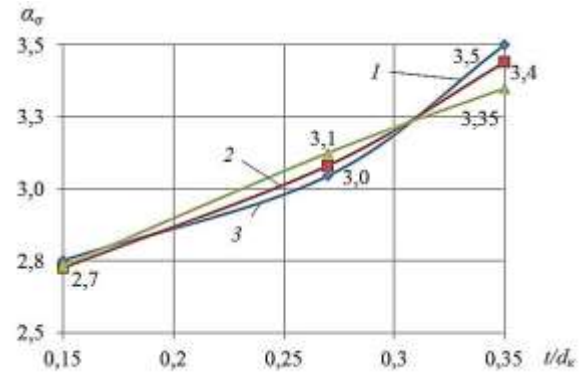


Рис. 13. Коэффициент концентрации напряжений в пластине при двухосном растяжении: 1 – $s=5$ мм; 2 – $s=10$ мм; 3 – $s=15$ мм

На рис. 13 изображен график зависимости коэффициента концентрации напряжения $\alpha_{\sigma} = \sigma_{\text{max}} / \sigma_{\text{кр}}$ от отношения t/d_k при высоте соединения s равной 5 мм (кривая 1), 10 мм (кривая 2), 15 мм (кривая 3).

При увеличении отношения t/d_k от 0,15 до 0,35 значение коэффициента концентрации напряжения α_{σ} увеличивается. Так, например, при высоте соединения $s=5$ мм наблюдается наиболее интенсивный рост коэффициента концентрации и значения изменяются с 2,7 до 3,5.

ВЫВОДЫ

- Получена зависимость оптимальной величины нагрева ΔT . 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 60 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безухов, Н. И.** Теория упругости и пластичности. Л.: Союзполиграфпром, 1953. 420 с. [N. I. Bezuhov. The theory of elasticity and plasticity. (in Russian). Leningrad.:Soyuzpoligrafprom. 1953.]
2. **Берендеев, Н. Н.** Применение системы Ansys к оценке усталостной долговечности. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно - телекоммуникационных систем и технологий». Нижний Новгород, 2006. 83 с. [N. N. Berendeev. Application of Ansys system for assessment of the fatigue life. Educational - methodical material for the training program "New approaches in research and development of information - telecommunication systems and technologies". (in Russian). Nizhny Novgorod. 2006.]
3. **Зайдес, С. А.** Технологическая механика осесимметричного деформирования. Иркутск, 2007. 432 с. [S. A. Zaides. Technological mechanics of axisymmetric deformation. (in Russian).Irkutsk.2007.]
4. **Биргер, И. А.** Прочность и надежность машиностроительных конструкций: Избранные труды. Уфа, 1998. 350 с.
[I. A. Birger. Durability and reliability of engineering structures: Selected Works. Ufa. 1998.]
5. **Жернаков В. С., Мардимасова Т.Н., Арсланов М.Р.** Влияние напряженно-деформированного состояния деталей из объемных наноматериалов на их усталостную прочность / Вестник УГАТУ. Т. 15. № 4 (44). 2011. с. 90–94. [V. S. Zhernakov, T.N. Mardimasova, M. R. Arslanov. " Effect of stress-strain state of parts of bulk nanomaterials on their fatigue strength" (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 15, no. 4 (44), pp. 90-94, 2011.]

ОБ АВТОРАХ

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, зав. каф. сопротивления материалов, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ. Чл.-корр. АН РБ. Автор 8 монографий, 2 учебников и 8 учебных пособий*, более 250 статей, 90 авторских свидетельств и патентов, им подготовлено 12 кандидатов и 8 докторов технических наук. Обл. науч. интересов – решение фундаментальных и прикладных задач теории упругости, пластичности, ползучести и механики разрушения применительно к основным элементам авиационных конструкций.

*с грифом Минобразования и УМО.

МАРДИМАСОВА Тамара Николаевна, канд. техн. наук, доцент. Автор 5 учебных пособий, свыше 100 публикаций, 4 авторских свидетельств и патентов. Обл. науч. интересов – решение задач механики процессов упруго-вязкого пластического деформирования конструкций.

АКБАШЕВ Вадим Ринатович, асп. каф. СМ, маг. техники и технологии (УГАТУ, 2015).

КОНЕВА Ксения Владимировна, магистрант каф. авиац. двигателей. Б-р техн. и технол. (УГАТУ, 2016).

METADATA

Title: Investigation of stress–strain state interference fit in pure shear and biaxial tension considering technological stresses.

Authors: Zhernakov V.S., Mardimasova T.N., Akbashev V.R.¹, Koneva K.V.

Email: ¹vadja92@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 12-18, 2016. **ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).**

Abstract: The calculation of the stress–strain state of the connection with interference "plate–ring" made of nanostructured pure and titanium alloy VT6. Obtained stress field distribution in a condition of pure shear and biaxial tension, taking into account technological stress. The influence of the radius of the ring structure and the thickness on the stress distribution pattern.

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. Author of 8 monographs, 2 textbooks and teaching aids 8, more than 250 articles, 90 patents, they trained 12 candidates and 8 doctors of technical sciences. Research interests – the solution of fundamental and applied problems, the theory of elasticity, plasticity, creeping and fracture mechanics as applied to the basic elements of aircraft structures.

MARDIMASOVA Tamara Nikolaevna, candidate of Technical Sciences., associate professor. Author of 5 textbooks and over 100 Publications, 4 patents. Research interests – the solution of problems of mechanics processes viscoelastic plastic deformation structures.

AKBASHEV Vadim Rinatovich, graduate student Department of Strength of Materials USATY. Master of Engineering and Technology (USATU 2015).

KONEVA Kseniya Vladimirovna, undergraduate chair aviation engines, Bachelor of Engineering and Technology (USATU, 2016).