

Оценка влияния обжатия отверстий обшивки летательных аппаратов на прочность

© К.А. Валуев, А.С. Чернятин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В работе проанализировано влияние процесса обжатия отверстий под заклепочное соединение в обшивке летательных аппаратов на прочность и определена оптимальная величина обжатия, при которой образуемое поле остаточных напряжений приводит к снижению напряжений под действием эксплуатационных нагрузок. Для этого в вычислительном комплексе ANSYS Workbench создана параметрическая конечно-элементная модель одноосно нагруженной пластины (обшивки) с центральным отверстием, обжимаемым сферическим штампом. Данная модель обеспечивает комплексное исследование напряженно-деформированного состояния в окрестности отверстия. Проведенные сравнительные расчеты пластины без предварительного обжатия отверстия и с предварительным обжатием показали, что при определенном уровне обжатия можно добиться снижения максимальных напряжений. Также в работе показано влияние радиуса сферического штампа.

Ключевые слова: *штамповка, упругопластическое деформирование, контактная задача, напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, коэффициент запаса по прочности.*

Введение. Одним из путей повышения долговечности обшивки летательного аппарата (ЛА) является процесс штамповки (обжатия). При выполнении обжатия в (при-)поверхностном слое металла образуется зона пластического деформирования, приводящая в результате к формированию поля остаточных напряжений. Растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях, складываясь с внешними нагрузками, могут вызывать разрушение деталей в процессе эксплуатации. В то же время создание на поверхности сжимающих остаточных напряжений затрудняет образование трещин и значительно (иногда в 2–3 раза) увеличивает усталостную прочность деталей и узлов [1].

Рассмотрению вопроса повышения долговечности тонкостенных элементов ЛА (обшивки) посредством предварительного обжатия (штамповки) отверстий заклепочных соединений посвящены различные работы как теоретического, так и экспериментального характера [2, 3]. Однако недостаточно опубликовано работ, в которых проводилось бы всестороннее исследование формирования полей остаточных и активных (при эксплуатационных нагрузках) напряжений с использованием численных методов. Поэтому целью данной работы является разработка численной *методики* моделирования упругопластиче-

ского поведения материала в окрестности отверстия обшивки на этапе обжатия и последующей эксплуатации обшивки при однократном нагружении, т. е. исследование на статическую прочность.

Рассматриваемая задача относится к контактным задачам механики твердого деформируемого тела и имеет ярко выраженную нелинейность, обусловленную высокой пластичностью дюралюминия (Д16), широко используемого в авиационно-космической промышленности. Это обусловлено малой удельной массой по сравнению со стальными или титановыми сплавами. При этом дюралюминий обладает такими параметрами, как весовая эффективность, ремонтпригодность, технологичность, надежность, экономичность, и рядом других, благодаря которым обеспечивается выполнение контроля качества конструкций. Среди этих параметров важнейшими являются характеристики надежности, статическая и циклическая трещиностойкости [4–7].

Постановка задачи. Ввиду многообразия различных типов соединений элемента обшивки и заклепочных швов возьмем конкретную модель участка обшивки на примере панели центроплана ЛА, рассмотренного в [8], и примем следующие размеры. Панель центроплана имеет в собранном виде длину 6 м и состоит из тонкостенной обшивки 1 из сплава Д16 толщиной 3 мм. Панель крепится к стрингерам неразъемными высокоресурсными непотайными клепаемыми швами, каждый из которых выполнен составными заклепками 2 диаметром 6 мм с шагом в шве $t_{\text{зак}} = 30$ мм. На рис. 1 представлена конструктивная схема панели.

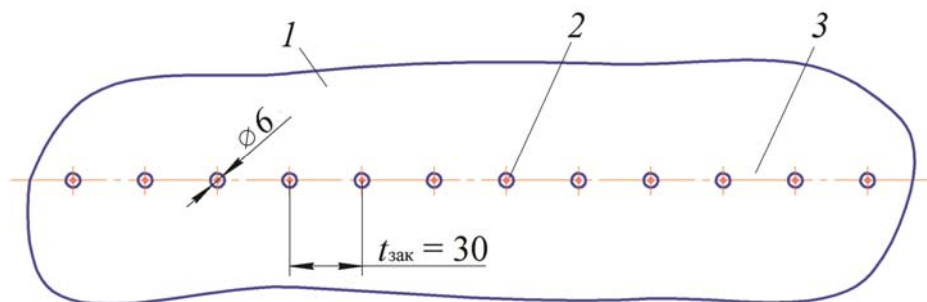


Рис. 1. Участок панели центроплана:

1 — тонкостенная обшивка; 2 — заклепки; 3 — заклепочный шов

В настоящей работе рассматривается *модельная задача*, в которой влияние соседних отверстий на исследуемое отверстие не учитывается ввиду того, что расстояние между ними превышает их диаметр в несколько раз. В среде ANSYS Workbench проводится численное моделирование одноосного растяжения квадратной пластины

($50 \times 50 \times 3$ мм) с отверстием диаметром $d = 6$ мм (рис. 2), которое предварительно обжимали сферическим штампом радиусом R . Для уменьшения временного ресурса при расчете была взята верхняя половина первой четверти пластины, что никак не сказывается на точности результата из-за симметрии задачи.

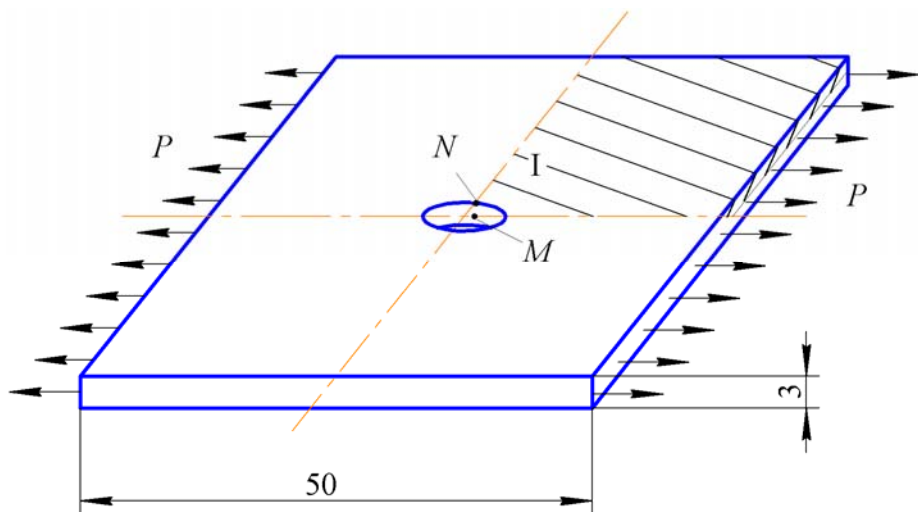


Рис. 2. Исследуемая модель

В точке N , лежащей на кромке центрального отверстия (см. рис. 2) в растягиваемой пластине (задача Кирша), коэффициент концентрации напряжений $k = 3$ [9]. Этот коэффициент отражает отношение наибольшего по величине напряжения в этой области к уровню напряжений в точках, удаленных от отверстия.

В данной работе выделим следующие основные этапы.

1. Расчет пластины, нагруженной внешней (эксплуатационной) силой P , без предварительного обжатия отверстия.
2. Определение допустимого значения радиуса сферического штампа для конкретного диаметра отверстия в пластине.
3. Проведение расчета пластины с отверстием, обжимаемым сферическим штампом радиуса R , с последующим нагружением внешней (эксплуатационной) силой P с целью определения оптимальной степени обжатия.
4. Сравнение результатов расчетов без обжатия и с предварительным обжатием и анализ изменения коэффициента запаса по прочности.

Расчет упругой пластины на растяжение (без обжатия). Эта задача решается как пространственная (не в плоской постановке): пластина моделируется как объемное тело. Внешняя нагрузка (растягивающее напряжение) принята равной 100 МПа. Следовательно,

напряжение в окрестности точки N должно быть $k \cdot 100 = 300$ МПа. Поскольку цель данной работы заключается в том, чтобы показать эффективность применения обжатия сферическими штампами, выберем для расчета эквивалентного напряжения энергетический критерий прочности Хубера — Мизеса, который позволяет учитывать трехосное напряженное состояние [10].

На рис. 3 представлено распределение эквивалентного напряжения в окрестности отверстия. Заметим, что максимальное эквивалентное напряжение (σ_{\max}) в точке N , в которой реализуется одноосное напряженное состояние, отличается от «теоретического» (300 МПа) не более, чем на 1 %. При этом в точке M , расположенной на поверхности отверстия в срединной плоскости пластины (см. рис. 2), $\sigma_{\max} = 315$ МПа, что можно объяснить возникновением объемного напряженного состояния (растягивающее напряжение вдоль действия внешней нагрузки и сжимающее напряжение — по толщине пластины). Очевидно, что чем тоньше листы обшивки по сравнению диаметром отверстия, тем меньше различаются значения σ_{\max} в точках N и M . Коэффициент запаса по прочности n :

$$n_0 = \sigma_B / \sigma_{\max} = 450 \text{ МПа} / 315 \text{ МПа} = 1,433. \quad (1)$$

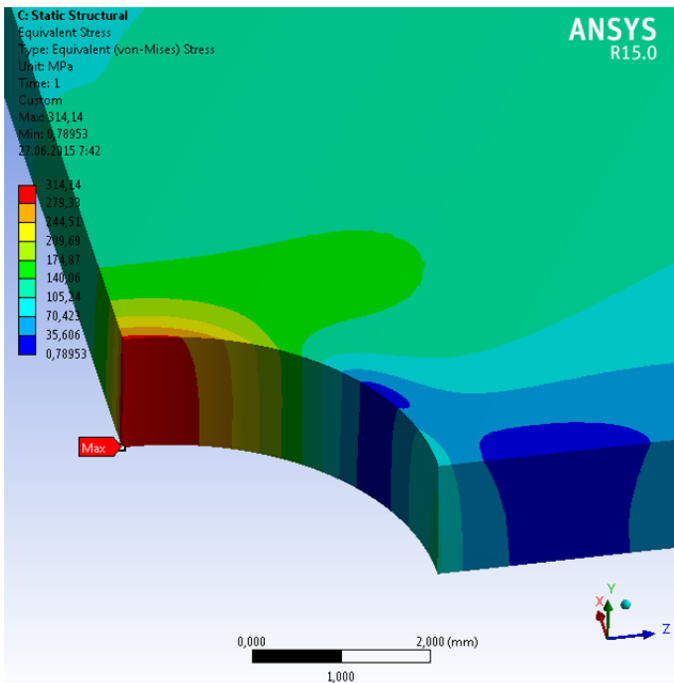


Рис. 3. Поля напряжений в пластине при действии растягивающей нагрузки

Расчет упругопластического поведения пластины с предварительным обжатием. На рис. 4 достаточно условно приведены этапы расчета предварительно обжатой пластины, включающие решение контактной упругопластической задачи для расчета остаточного состояния.

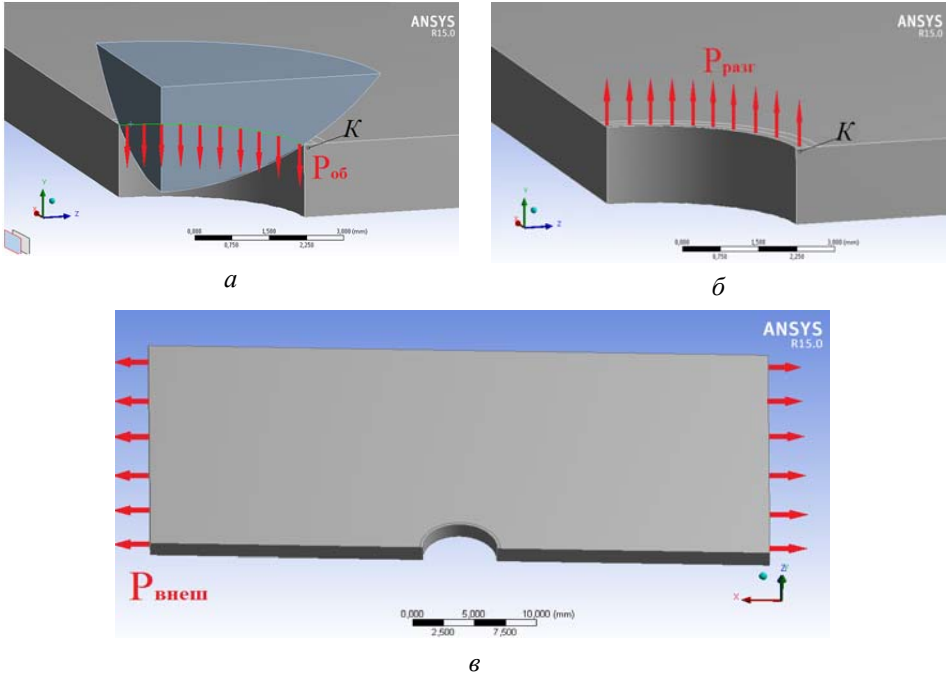


Рис. 4. Этапы расчета контактной упругопластической задачи: *а* — обжатие; *б* — разгрузка; *в* — внешнее нагружение

Проведенная оценка величины вдавливания штампа (обжатия), при которой в материале пластины будут возникать пластические деформации, составляет $\delta \approx 0,007$ мм. Данный расчет проводился на основе простой модели сжимаемого стержня диаметром d и длиной, равной толщине пластины h ; упругие характеристики стержня соответствуют материалу Д16.

На основе решения осесимметричной задачи (о всесторонне растягиваемой пластине с отверстием) был выбран диапазон значений радиуса сферического индентора (штампа), обеспечивающий при указанном обжатии уровень напряжений в области отверстия, не превышающий предела прочности, но больше, чем предел текучести (чтобы однозначно возникало пластическое деформирование). Ниже приведены результаты оценки влияния радиуса штампа R при одинаковой степени обжатия δ на величину максимального эквивалентного напряжения:

Результаты расчетов максимального эквивалентного напряжения в пластине при $\delta = 0,007$ мм

R , мм	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
σ_{\max} , МПа	552,2	524,7	493,2	467,1	445,5	426,8	419,4	409,2	400,5	392,9

При увеличении радиуса уровень напряжений снижается, однако достаточно большой радиус приведет к увеличению размеров индентора. Тогда, как следствие, для достижения пластического деформирования потребуется увеличение силы обжатия из-за увеличения площади контакта. Предпочтительным является радиус сферической поверхности индентора более 10 мм.

Рассмотрим решение задачи в пространственной постановке с радиусом шарика индентора $R = 12$ мм при различной обжатии (таблица) и последующем действии одноосного растягивающего внешнего напряжения в 100 МПа. Влияние размера элементов сетки в области контакта несущественно и составляет 10...20 МПа (т. е. 2...5 %) в зависимости от величины обжатия δ .

Результаты расчетов максимального эквивалентного напряжения в пластине и коэффициента запаса при $R = 12$ мм

δ , мм	σ_{\max} , МПа		n
	во время обжатия	после нагрузки внешней силой	
0,007	420,8	296,5	1,518
0,008	408,9	288,2	1,561
0,009	397,2	277,8	1,620
0,010	396,4	274,9	1,637
0,011	400,3	276,1	1,630
0,012	413,7	278,3	1,617
0,013	419,3	282,5	1,570
0,014	426,6	300,8	1,496
0,015	429,3	310,3	1,450

Предварительное обжатие индентором сферической формы, повлекшее за собой пластическое деформирование и остаточные напряжения в окрестности контакта, как можно судить по полю эквивалентного напряжения на рис. 5, оказало влияние на напряженно-деформированное состояние в прилегающей области отверстия пластины. По сравнению с результатами, полученными ранее — для нагруженной пластины без предварительного обжатия, — максимальное эквивалентное напряжение уменьшилось на 12,7 %.

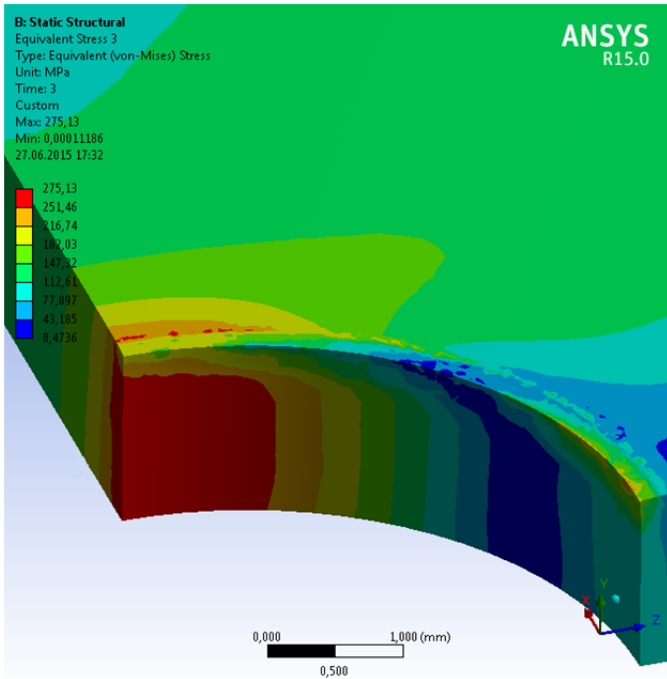


Рис. 5. Поле напряжений в окрестности предварительно обжатого отверстия пластины при нагружении в 100 МПа

На рис. 6 представлена зависимость максимального эквивалентного напряжения от величины обжатия пластины индентором радиусом $R = 12$ мм при растягивающей нагрузке 100 МПа.

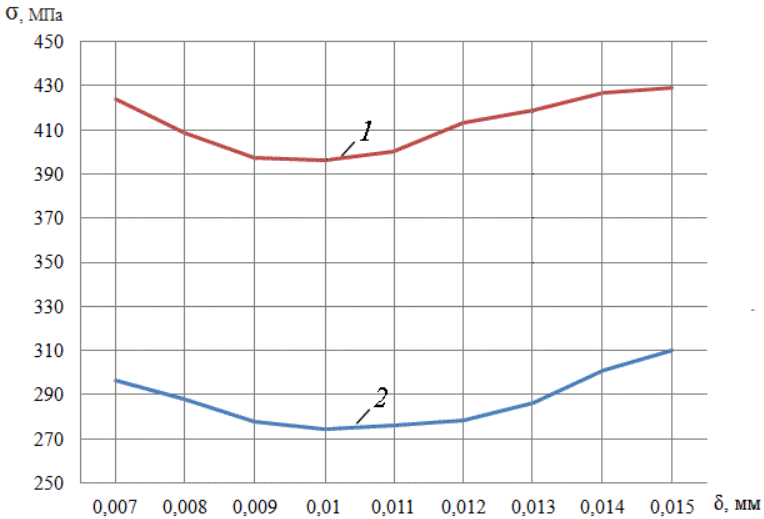


Рис. 6. Графики зависимости максимального эквивалентного напряжения σ_{\max} от степени обжатия:
 1 — при обжатии; 2 — при нагружении эксплуатационной силой

Минимуму величине эквивалентного напряжения соответствует величина обжатия около $\delta = 0,01$ мм. Данная величина, по сути, является оптимальной для растягивающей внешней нагрузки 100 МПа при радиусе сферы штампа $R = 12$ мм. Коэффициент запаса по прочности по сравнению с n_0 увеличился на 14,2 %.

Таким образом, в работе показано, что существует оптимальная величина обжатия, при которой понижаются напряжения в зоне отверстия. Несмотря на то, что данный результат получен для статического нагружения, при действии циклических нагрузок коэффициент запаса по усталостной прочности, предположительно, должен увеличиться более значительно, так как фактически предварительное обжатие понижает коэффициент концентрации напряжений около отверстия. Для оценки влияния обжатия сферическим штампом на увеличение долговечности обшивки необходимо изучение вопроса определения эквивалентного напряжения в условиях объемного напряженного состояния и с учетом его неоднородного распределения. Данный вопрос авторы статьи оставляют для последующих исследований.

Заключение. При разработке методики расчета неоднородного напряженно-деформированного состояния в окрестности предварительно обжатого штампом отверстия (под заклепочное соединение обшивки ЛА) в среде ANSYS Workbench была создана параметрическая модель, обеспечившая проведение оценки влияния степени предварительного пластического деформирования сферическим штампом на уровень эквивалентного напряжения, возникающего при последующем одноосном нагружении пластины с отверстием. Полученные результаты подтверждают эффективность предварительного пластического деформирования, приводящего к повышению прочности при статическом нагружении, что также будет способствовать повышению долговечности конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вишняков М.А., Вашуков Ю.А. *Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения*. Самара, Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2005, с. 24–28.
- [2] Рудзей Г.Ф. *Обоснование путей повышения усталостной долговечности заклепочных и сварных соединений авиационных конструкций технологическими методами*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2007.
- [3] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. *Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Справочник. Москва, Машиностроение, 1985, 224 с.
- [4] Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение. Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2008, № 3, с. 28–29.

- [5] Каблов Е.Н. *Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века*. Москва, 1999, с. 4–6.
- [6] Демидов С.П. *Теория упругости*. Москва, Высшая школа, 1979, с. 302–304.
- [7] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. Изд. 10-е. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, с. 352–353.
- [8] *Алюминий D16*. URL: http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/alu/D16 (дата обращения 11.06.2015).
- [9] *Алюминиевые, титановые, магниевые и бериллиевые сплавы*. URL: http://viam.ru/sites/default/files/uploads/booklets/pdf/alumin_2012.pdf (дата обращения 11.06.2015).
- [10] Макаров А. Ф., Васильев С.Л., Громов В.Ф. *Способ соединения деталей неразъемным заклепочным швом*. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2288380.html> (дата обращения 10.06.2015).

Статья поступила в редакцию 10.07.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Валуев К.А., Чернятин А.С. Оценка влияния обжата отверстий обшивки летательных аппаратов на прочность. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1403.html>

Валуев Кирилл Алексеевич родился в 1993 г. Магистрант МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: valuevkirill@yandex.ru

Чернятин Александр Сергеевич родился в 1984 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007 г. Канд. техн. наук, инженер-механик-исследователь, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области механики разрушения, экспериментально-численных методов определения нагруженности и дефектности элементов конструкций. e-mail: cas@inbox.ru

Evaluation of the effect of compression of the holes of the cladding of aircrafts on strength

© K.A. Valuev, A.S. Chernyatin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article analyzes the impact of the holes compression process in the riveted joint in the sheathing of aircraft on the strength. Optimal amount of compression at which the generated residual stress field leads to a significant reduction of stress at operating loads is determined. For this purpose, using ANSYS Workbench we created a parametric finite element model of an uniaxial loaded plate (plating) with central hole, i.e. compression spherical stamp. This model provides a comprehensive study of stress-strain state in the vicinity of the hole. Comparative calculations of the plate without any preliminary compression of the hole and with compression showed that at certain level of compression we can achieve reduction of maximum stresses. The work also shows the influence of the radius on the stamp.

Keywords: stamping, elastoplastic material deformation, contact problem, stress strain state, residual stress, safety factor.

REFERENCES

- [1] Vishnyakov M.A., Vasyukov Yu.A. *Konstruktorsko-tehnologicheskie metody obespecheniya kachestva izdeliy mashinostroeniya* [Design and technological methods to ensure the quality of engineering products]. Samara, Samara State Aerospace University, 2005, pp. 24–28.
- [2] Roudzey G.F. *Obosnovanie putei povysheniya ustalostnoi dolgovechnosti zaklepochnykh i svarnykh soedinenii aviatsionnykh konstruksii tekhnologicheskimi metodami* [Justification of the ways of increasing the fatigue life of riveted and welded joints in aircraft structures engineering methods]. Cand. Sci. (Engineering) Thesis. Moscow, 2007.
- [3] Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschet dealei mashin i konstruksii na prochnost i dolgovechnost* [Calculation of machine details and structures for strength and durability]. Handbook. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 224 p.
- [4] Kablov E.N. *Aviakosmicheskoe materialovedenie* [Aerospace material science]. In: *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik* [All materials. Encyclopedic reference], 2008, no. 3, pp. 28–29.
- [5] Kablov E.N. *Osnovnye napravleniya razvitiya materialov dlya aviakosmicheskoi tekhniki XXI veka* [The main directions of development of materials for aerospace technology of the XXI century]. Moscow, 1999, pp. 4–6.
- [6] Demidov S.P. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979, pp. 302–304.
- [7] Feodosiev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. 10th ed. Moscow, BMSTU Publ., 1999, pp. 352–353.
- [8] *Aluminii D16* [D16 Aluminum]. Available at: http://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/D16 (accessed 11.06.2015).
- [9] *Aluminievye, titanovye, magnievye i berilievye splavy* [Aluminum, titanium, magnesium and beryllium alloys]. Available at: http://viam.ru/sites/default/files/uploads/booklets/pdf/alumin_2012.pdf (accessed 11.06.2015).

- [10] Makarov A.F., Vasil'ev S.L., Gromov V.F. *Sposob soedineniya detalei neraziomnym zakliopochnym shvom* [Method of joining parts of a one-piece riveted seam]. Available at: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2288380.html> (accessed 10.06.2015).

Valuev K.A. (b. 1993) master student of the Bauman Moscow State Technical University. e-mail: valuevkirill@yandex.ru

Chernyatin A.S. (b. 1984) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Cand. Sci. (Eng.), mechanical engineer-researcher, associate professor of "Applied mechanics" Department at BMSTU. Author of 15 scientific papers in the field of fracture mechanics, experimental and numerical methods for determining the loading of defects in structural elements. e-mail: cas@inbox.ru