

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**

**Қ.И. СӘТБАЕВ атындағы ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХИКАЛЫҚ  
УНИВЕРСИТЕТІ  
КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени К.И.САТПАЕВА**

**«МЕХАНИКАНЫҢ ЖӘНЕ МАШИНА ЖАСАУДЫҢ  
ӨЗЕКТІ МӘСЕЛЕЛЕРІ»**

**АТТЫ IV ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ КОНФЕРЕНЦИЯНЫҢ  
МАТЕРИАЛДАРЫ**

**19-20 маусым 2014 ж.**

**МАТЕРИАЛЫ IV МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ И  
МАШИНОСТРОЕНИЯ»**

**19-20 июня 2014 г.**

**I ТОМ**

**АЛМАТЫ 2014**

УДК 621.0 (063)  
ББК 34.41  
М 49

**Редакционная коллегия:**

Тюреходжаев А.Н., Абдрахманов С.А., Дуйшеналиев Т.Б., Ершин Ш.А.,  
Кальменов Т.Ш., Калыбаев А.А., Калтаев А.Ж., Сакабеков А.С.,  
Масанов Ж.К., Тусупбеков М.Р., Уалиев Г.У., Шыныбаев М.Д.

*Под редакцией* Академика НИА РК и Нью-Йоркской АН, доктора физико-математических наук, профессора Тюреходжаева Абибуллы Назаровича

**Механиканың және машина жасаудың өзекті мәселелері =  
Актуальные проблемы механики и машиностроения: IV** Халықар. ғыл.  
конф. материалдары (19-20 маусым 2014ж.) / Жалпы ред. басқ.  
А.Н. Тюреходжаев - Алматы: «\_\_\_\_\_» баспасы, 2014. - 404 б. – Қазақша,  
орысша

ISBN 978-601-288-677-9  
Т. 1 – 404 б.  
ISBN 978-601-288-678-6

В сборнике представлены доклады участников IV Международной научной конференции «Актуальные проблемы механики и машиностроения»

УДК 621.0 (063)  
ББК 34.41

ISBN 978-601-288-678-6 – (Т.1) ISBN 978-601-288-677-9	© Казахский национальный технический университет имени К.И.Сатпаева, 2014
--	---

<b>Бакиров Ж.Б., Бакиров М.Ж. (Казахстан)</b> Напряженное состояние массива при импульсном нагружении.....	229
<b>Бешимбаева Р.М. (Казахстан)</b> Расчет тонкостенных оболочек в среде АРМ WinMachine.....	238
<b>Бибосынов А.Ж, Садыков К.А, Шапыык Т., Тургумбаев А.А, Матаев Б. (Казахстан)</b> Статистический анализ временных рядов данных о смещений земной поверхности локальных GPS – пунктов г.Алматы.....	242
<b>Божанов Е.Т., Ибраимкулов А.М., Сауранбаева А. (Казахстан)</b> Аналитико – расчетная модель нефтегазовой смеси из симуляционной модели резервуара с переменными параметрами, когда форма поперечного сечения конусоидального типа при добыче и транспортировке.....	249
<b>Божанов Е.Т., А.М Ибраимкулов, С.Д. Есентуреева, С. Жұмахан. (Казахстан)</b> Аналитико расчетная модель тяжелой нефти из симуляционной модели резервуара с переменными параметрами, лежащая на основании типа винклера, когда форма поперечного сечения конусоидального типа при добыче и транспортировке.....	258
<b>Дуйшеналиев Т.Б., Закирьянова Г.К. (Кыргызстан, Казахстан)</b> О единственности решений краевых задач динамики анизотропных упругих сред при антиплоской деформации с учетом ударных волн.....	268
<b>Дуйшеналиев Т.Б., Сарсенов Б.Т. (Казахстан)</b> О динамике наземного сооружения в эпицентре землетрясения и вдали от него.....	275
<b>Жумабаев Б., Ботаканова Б.А. (Кыргызстан)</b> Методика математического моделирования напряженного состояния вокруг напорного тоннеля, расположенного в горном массив.....	283
<b>Закирьянова Г.К. (Казахстан)</b> Динамика анизотропных сред при действии импульсных сосредоточенных источников.....	291
<b>Индиаминов Р.Ш., Муртазаева У.И., Наркулов А. (Узбекистан)</b> О численном исследовании нестационарных задач магнитоупругости гибких токонесущих ортотропных оболочек	298
<b>Искакбаев А. И. (Казахстан)</b> Расчет упругопластических течений пористой среды методом расщепления.....	304
<b>Искакбаев А.И., Бекбауов Б.Е., Бибосинов А.Ж. (Казахстан)</b> Численное моделирование и исследование упругопластических течений вокруг кругового отверстия.....	311
<b>Китаева Д.А., Рудаев Я.И. (Росси, Кыргызстан)</b> О чувствительности к структурным превращениям при деформации алюминиевых сплавов	319

5. *Iskakbayev A. and others.* A new approach for analysis the elastoplastic flows // Abstract Book, 23<sup>rd</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 19-24 August 2012, – Beijing, China. P. 288. (CD-ROM)
6. *Работнов Ю.Н., Степанычев Е.И.* Описание упругопластических анизотропных свойств стеклопластиков. //Инженерный журнал МТТ. 1968. № 1. С. 63 – 73.
7. *Николаевский В.Н.* Допредельная пластичность пористых материалов. /Механика деформируемых тел и конструкций. – М.: Машиностроение, 1975.С. 342-348.
8. *Carroll M.M., Holt A. C.* Static and Dynamic Pore-Collapse Relation for Ductile Porous Materials. //J. Appl. Phys., 43, No.4, 1972.
9. *Дунин С. З., Сурков В.В.* Уравнение состояния газонасыщенных сред // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1978. № 11. С.63 – 69.
10. *Дунин С. З., Сироткин В.К., Сурков В.В.* О распространении волн в пористых телах // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. №3. С.92-98.
11. *Bhatt J.J., Carroll M.M., Schatz J.F.* A spherical model calculation for volumetric response of porous rocks. // J. Appl. Mech. June 1972. Имеется перевод: Прикладная механика. – М.: МИР,1975.
12. *Николаевский В.Н.* Динамическая прочность и скорость разрушения. /Механика. Новое в зарубежной науке. Том. 26. С. 166-203. 1981.
13. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука. 1966.
14. *Искакбаев А. И.* Задачи по МДТТ. – Алматы: Қазақ университеті. 2001. – 86с.

УДК 539.3

*А.И. Искакбаев, Б.Е. Бекбауов, А.Ж. Бибосинов  
КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ВОКРУГ КРУГОВОГО ОТВЕРСТИЯ**

Задачи по концентрации напряжений возле отверстий актуальны в изучении свойств материалов имеющие круговые вырезы при сложных внешних нагрузках. Описание упругопластических течений возле отверстий описывается уравнениями теории пластичности.

### **1 Математическая модель и методы вычисления.**

*Основные уравнения теории упругости*  
 Дифференциальные уравнения равновесия:

$$\frac{\partial^2(\rho \mathbf{u})}{\partial t^2} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \rho \mathbf{f} \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{f}$  – объемные силы;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений.

Геометрические уравнения – геометрические соотношения Коши:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (2)$$

где  $\boldsymbol{\varepsilon}$  – тензор деформации.

Физические уравнения – формулы закона Гука, связывающие напряжения и деформации:

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \boldsymbol{\varepsilon} + \lambda \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \mathbf{I} \quad (3)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $\mu, \lambda$  – коэффициенты Ламе, определяющиеся с помощью модуля упругости Юнга  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ :

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda = \begin{cases} \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-\nu)} & \text{ПНС} \\ \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} & \text{ПД} \end{cases} \quad (4)$$

Используя вышеизложенные формулы, основное уравнение теории упругости можно переписать в перемещениях:

$$\frac{\partial^2(\rho \mathbf{u})}{\partial t^2} - \nabla \cdot [\mu \nabla \mathbf{u} + \mu (\nabla \mathbf{u})^T + \lambda \mathbf{I} \operatorname{tr}(\nabla \mathbf{u})] = \rho \mathbf{f} \quad (5)$$

*Аспекты математической теории идеальной пластичности*

Для расчетов упругопластических деформаций при не одноосном напряженном состоянии необходимо располагать зависимостями компонентов напряжений от компонентов деформации за пределами упругости. Эти зависимости устанавливаются в теории пластичности. Существующие теории пластичности можно разбить на две группы.

В первой группе теорий, которые называются деформационными, устанавливаются зависимости между напряжениями и деформациями.

Во второй группе рассматриваются связи между бесконечно малыми приращениями деформаций и напряжений, а также самими напряжениями. В частном случае получают зависимости скоростей деформации от

напряжений. В этих теориях пластическая деформация рассматривается как процесс пластического течения материала. Поэтому они называются теориями течения.

В основу теории течения положены следующие гипотезы:

1. Объемная деформация прямо пропорционально среднему нормальному напряжению, причем связывающий их коэффициент пропорциональности тот же, что и в пределах упругости.

2. Компоненты девиатора приращений пластических деформации прямо пропорциональны компонентам девиатора напряжений.

3. Интенсивность напряжений является функцией интеграла от интенсивности приращений пластических деформаций, не зависящей от типа напряженного состояния. [1]

Приращение деформации  $d\varepsilon$  складывается из упругой  $d\varepsilon_e$  и пластической  $d\varepsilon_p$  частей:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_e + d\varepsilon_p \quad (6)$$

Упругая часть приращения деформации подчиняется закону Гука в приращениях:

$$d\sigma = 2\mu(d\varepsilon_e) + \lambda \mathbf{I} d\varepsilon_e, \quad d\varepsilon_e = d\varepsilon - d\varepsilon_p \quad (7)$$

Используя вышеизложенные аспекты теории пластичности квазистатическое уравнение для перемещений в приращениях можно записать в следующем виде (без учета объемных сил):

$$\nabla \cdot \{ \mu \nabla(d\mathbf{u}) + \mu [\nabla(d\mathbf{u})]^T + \lambda \mathbf{I} \operatorname{tr}[\nabla(d\mathbf{u})] - [2\mu(d\varepsilon_p) + \lambda \mathbf{I} \operatorname{tr}(d\varepsilon_p)] \} = \mathbf{0} \quad (8)$$

где  $d\mathbf{u}$  – приращение вектора перемещений.

#### *Примененные методы вычисления*

В данной работе рассматривается случай идеальной пластичности. Идеальная пластичность определяется следующим образом – существует максимальное значение напряжения, в пределах которого твердое тело сохраняет упругие свойства, по достижению которого тело подвергается необратимым деформациям без дальнейшего увеличения напряжений или нагрузки.

Приращение тензора пластических деформаций  $d\varepsilon_p$  зависит от значения напряжения: ниже предельного значения имеет место только упругие деформации,  $d\varepsilon_p = \mathbf{0}$ ; по достижению предельного значения появляются пластические деформации, значение  $d\varepsilon_p$  вычисляются от напряжений  $\sigma$ .

Введем условие пластичности Мизеса

$$f = \sqrt{J_2} - k = 0, \quad J_2 = \frac{1}{2} s : s \quad (9)$$

где  $J_2$  – второй инвариант девиатора напряжений;  $k$  – предел текучести;  $s$  – девиатор напряжений, без упрочнения  $dk = 0$ . Соответственно при  $f < 0$  имеет место только упругие деформации,  $d\varepsilon_p = \mathbf{0}$ ; при  $f \geq 0$  выполняются следующие процедуры:

$$d\sigma = \left[ iso(\sigma_e) + \frac{k}{\sqrt{J_2}} dev(\sigma_e) \right] - \sigma_n$$

$$d\varepsilon_e = \frac{iso(d\sigma)}{3\lambda + 2\mu} + \frac{dev(d\sigma)}{2\mu}$$

$$d\varepsilon_p = d\varepsilon - d\varepsilon_e = \frac{1}{2} \{ \nabla(d\mathbf{u}) + [\nabla(d\mathbf{u})]^T \} - d\varepsilon_e$$

## 2 Постановка задачи

Рассмотрим задачу о растяжении плоскости с круговым вырезом радиуса  $a$ , испытывающей на бесконечности различные растяжения в направлениях  $x, y$  (рисунок 1), т.е. при  $r \rightarrow \infty$  напряжения  $\sigma_{xx} \rightarrow p, \sigma_{yy} \rightarrow q, \sigma_{xy} \rightarrow 0$ , также примем  $q \geq p$ ; отверстие свободно от напряжений: при  $r = a$  напряжения  $\sigma_r = \sigma_{r\varphi} = 0$ .

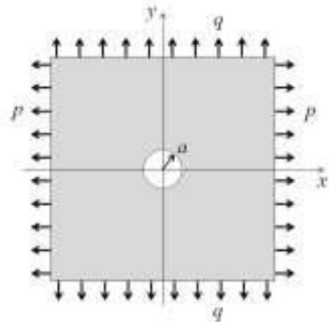


Рисунок 1 – Растяжение плоскости с круговым вырезом, испытывающей на бесконечности различные растяжения.

Система координат  $xu$  имеет начало в центре отверстия и ориентирована так, что оси  $x$  и  $y$  являются главными осями напряженного состояния в бесконечности.

## 3 Результаты вычислений в различных вариантах постановки задачи.

### 3.1 Всестороннее растяжение тонкой неограниченной пластинки с круговым отверстием

В данном варианте рассматривается случай плоского напряженного состояния ( $\sigma_{zz} = 0$ ) пластины с отверстием, растянутой осесимметрично

относительно центра отверстия, т.е.  $q = p$ . Из условия симметрии нагружения следует, что пластическая область представляет собой кольцевой диск. Напряжения в пластической области должны удовлетворять уравнению равновесия и условию пластичности Хубера-Мизеса, которое имеет следующий вид

$$\sigma_i = \sigma_T \quad (10)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений,  $\sigma_T$  – предел текучести при растяжении. Принято говорить, что задача определения напряжений в пластической области является статически определяемой. Однако эта статическая определяемость условна, так как напряжения определяются не только из одного уравнения статики, но также и из условия пластичности [1].

Этот случай был исследован аналитический Г.Ю. Джаналидзе (описание в [1]), который представляет интерес с точки зрения исследования концентрации напряжений за пределами упругости. Им было найдено аналитическое решение для радиуса границы  $r_T$ , разделяющей упругую и пластическую области, значения напряжений в соответствующих областях (рисунки 2-3).

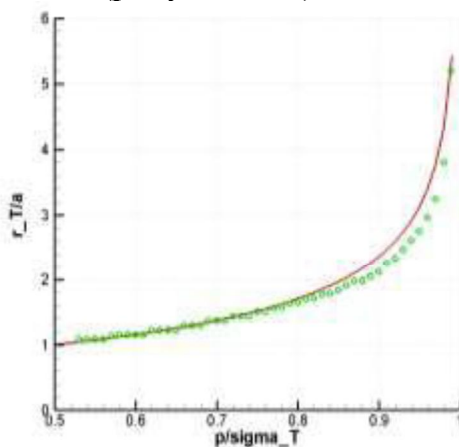


Рисунок 2 – Значения радиуса границы, разделяющей упругую и пластическую области  $r_T/a$  в зависимости от нагружения  $p/\sigma_T$ . Сплошная линия представляет аналитическое решение, круговые точки – численное.

На рисунке 2 представлены безразмерные значения радиуса границы, разделяющей упругую и пластическую области  $r_T/a$  в зависимости от безразмерных значений нагружения  $p/\sigma_T$ . Численные результаты показывают хорошее совпадение с аналитическими решениями в данной постановке задачи.

### 3.2 Двухосное растяжение тонкой неограниченной пластинки с круговым отверстием



В данном варианте рассматривается случай плоского напряженного состояния ( $\sigma_{zz} = 0$ ) пластины с отверстием, испытывающей на бесконечности различные растяжения в направлениях  $x, y$ , т.е.  $q \geq p \geq 0$ .

Аналитическое решение данной задачи, разобранное Г.П. Черепановым [2,3], основано на условии текучести Треска – Сен-Венана

$$\tau_{max} = k, \quad (11)$$

выражающее, что максимальное касательное напряжение постоянно, и представлено в замкнутой форме.

По Г.П. Черепанову, упругопластической границей служит некоторый овал, уравнения которого могут быть представлены в параметрической форме

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{b}{1-\chi^2} [(1+2\chi)\cos t + \chi^2\cos 3t] \\ y &= \frac{b}{1-\chi^2} [(1-2\chi)\sin t + \chi^2\sin 3t] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

а величина  $\chi$  является действительным корнем кубического уравнения

$$\chi^2 + \chi = \frac{q-p}{4k-(p+q)}, \quad b = a \frac{2k}{4k-(p+q)}. \quad (13)$$

Упругопластическая граница представляет собой овал при  $\chi < 1/3$ , а при  $\chi > 1/3$  появляется петля лишняя механического смысла.

Также существуют некоторые ограничения решения Г.П. Черепанова. Принимая для определенности, что  $0 \leq p \leq q \leq 2k$ , приведем условия, которым должны удовлетворять  $p, q$  и  $\chi$ , чтобы пластическая зона полностью охватывала весь круговой контур, и решение имело механический смысл:

$$0 \leq \chi \leq -\frac{2k-(p+q)}{6k-(p+q)} \quad \text{и} \quad 2k \leq p+q \leq 3k.$$

Вышеизложенные условия ограничивают аналитическое решение для нагружений  $p$  и  $q$ . В таблице 1 приведены проведенные численные исследования для выделенных значений  $p$  и  $q$ , и результаты сравнений с точными решениями, где  $c$  и  $d$  – расстояния упругопластической границы от центра отверстия вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Таблица 1 – Сравнение численных результатов с точными решениями

$p/k$	$q/k$	Точное решение по Г.П. Черепанову		Численное решение		Точное решение по Г.Ю. Джаналидзе ( $p = q$ )
		$c/a$	$d/a$	$c/a$	$d/a$	
1.0	1.0	1.000	1.000	1.111	1.111	1.115
1.1	1.1	1.111	1.111	1.190	1.190	1.221
1.1	1.2	1.323	1.046	1.323	1.147	-
1.2	1.2	1.250	1.250	1.294	1.294	1.351
1.2	1.3	1.523	1.167	1.456	1.265	-
1.2	1.4	1.894	1.077	1.632	1.301	-
1.3	1.3	1.429	1.429	1.441	1.441	1.517
1.3	1.4	1.793	1.320	1.632	1.397	-
1.3	1.5	2.313	1.201	1.868	1.367	-
1.3	1.6	3.069	1.077	2.162	1.323	-
1.4	1.4	1.667	1.667	1.635	1.635	1.741
1.4	1.5	2.179	1.517	1.838	1.544	-
1.4	1.6	2.956	1.353	2.176	1.912	-
1.5	1.5	2.000	2.000	1.950	1.950	2.071

### 3.3 Двухосное растяжение толстой неограниченной пластинки с круговым отверстием

В данном варианте рассматривается случай плоской деформации пластины с отверстием, испытывающей на бесконечности различные растяжения по направлениям  $x$  и  $y$ .

Данная упругопластическая задача разобрано Л.А. Галиным [3,4]. Точное решение задачи получено в замкнутой форме. По Л.А. Галину упругопластической границей служит эллипс, уравнение которого представлено так:

$$\frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{d^2} = 1, \quad (14)$$

а полуоси  $c$  и  $d$  определяются следующим образом:  $c = b(1 + \chi)$ ,  $d = b(1 - \chi)$  используя следующие обозначения:

$$b^2 = a^2 \exp\left(\frac{p+q}{2k} - 1\right), \quad \chi = \frac{q-p}{2k}.$$

Для приведенного точного решения существенно, чтобы пластическая зона охватывала весь круговой контур. Отсюда  $d \geq a$ , которое налагает на  $p$  и  $q$  известное ограничение  $q - p \leq 2k$ . Кроме того, необходимо, чтобы любая точка пластической зоны могла быть соединена с круговым контуром отверстия двумя линиями скольжения, полностью расположенными в пластической зоне. Это справедливо при выполнении неравенства

$$\frac{c}{d} = \frac{1+\chi}{1-\chi} \leq \sqrt{2} \quad \text{т.е.} \quad q - p \leq 2(3 - 2\sqrt{2})k = 0.342k. \quad (15)$$

Отметим, что в предложенном Л.А. Галиным методе функция напряжения является бигармонической как в упругой, так и в пластической зонах. [2,3].

Таблица 2 – Сравнение численных результатов с точными решениями

$p/k$	Точное решение по Л.А. Галину		Численное решение	
	$c/a$	$d/a$	$c/a$	$d/a$
3.0	2.7183	2.7183	2.71	2.71
2.8	2.8443	2.3271	2.78	2.34
2.6	2.9515	1.9677	2.93	2.07
2.4	3.0415	1.6378	2.97	1.80
2.2	3.1158	1.3353	3.12	1.61
2.0	3.1755	1.0585	3.30	1.39
1.8	3.2220	0.8055	3.71	1.20

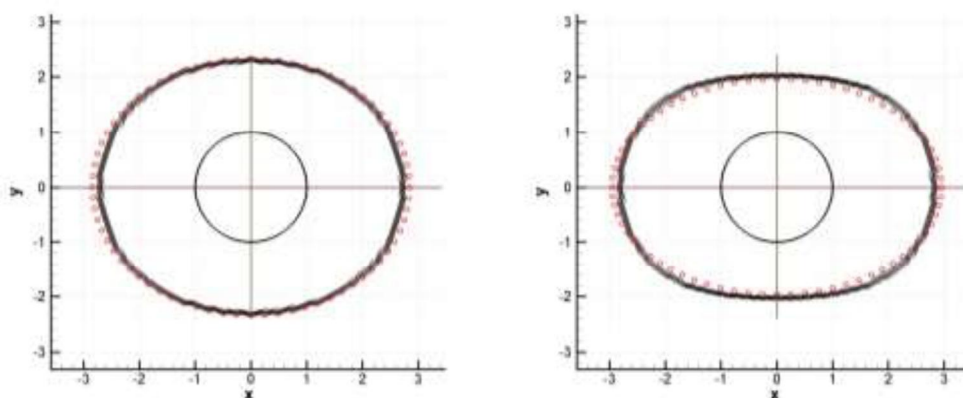


Рисунок 3 – Уругопластическая граница в безразмерных значениях. Слева при  $p/k = 2.8$ , справа при  $p/k = 2.6$ . Сплошные линии представляют численное решение, круговые точки – точное решение по Л.А. Галину.

В таблице приведены результаты вычислений для  $q = 3k$ , выполненных по приведенным аналитическим формулам и численной реализацией в безразмерных переменных. На рисунке 3 представлены сравнительные результаты численного метода и точного метода по Л.А. Галину. При выполнении условия (15) имеются хорошие совпадения.

#### 4 Заключение.

Представленные результаты численного моделирования хорошо совпадают с точными решениями поставленных задач. Описанные методы вычисления вполне применимы для более сложных постановок задач исследования концентрации напряжений вокруг вырезов любой формы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1968. – 400с.
2. *Савин Г.Н.* Распределение напряжений около отверстий. – Киев: Наукова Думка, 1968. – 888с.
3. *Соколовский В.В.* Теория пластичности. – М.: Высшая школа, 1969. – 608с.
4. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420с.
5. EA de Souza Neto, D Peri'с DRJ Owen. Computational methods for plasticity – Theory and applications. Wiley, 2008. – 816p.

УДК 539.3

*Китаева Д.А.<sup>1</sup>, Рудаев Я.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия;*  
*Кыргызско-Российский Славянский университет им. Б.Н. Ельцина,  
г. Бишкек, Кыргызстан*

### **О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К СТРУКТУРНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЯМ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*Analytical expression for function sensitivity of aluminum alloys to the structural transformations connected at superplasticity with the mechanism of dynamic recrystallization is offered. The interrelation of this expression with the evolutionary equations of the model describing regularities deformation of alloys in the wide temperature and high-rate ranges, including superplasticity is shown.*

Сверхпластичность будем определять [1] как особое состояние поликристаллического материала, пластически деформируемого при низком уровне напряжений с сохранением в продеформированном металле исходной ультрамелкозернистой структуры (структурная сверхпластичность) или её формированием в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность).

Первые опыты [2, 3], в результате которых были получены аномальные удлинения при растяжении, проводились на сплавах с подготовленной ультрамелкозернистой структурой (1...2 мкм). Позднее было обнаружено, что существуют классы металлических композиций, которым в определенных температурно-скоростных условиях свойственно