



TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA
ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ



FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
МАШИННО-ТЕХНОЛОГИЧЕН ФАКУЛТЕТ

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
“70 years FIT”**

FIT`2015

**the 28-th International Scientific Conference
of the Faculty of Industrial Technology of Technical University of Sofia**

PROCEEDINGS

**МЕЖДУНАРОДНА НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ
„70 години МТФ“**

МТФ`2015

**28-ма Международна научна конференция
на Машино-технологичния факултет на ТУ – София**

СБОРНИК ДОКЛАДИ

**11-13 SEPTEMBER 2015
SOZOPOL, BULGARIA**

**11-13 СЕПТЕМВРИ 2015
СОЗОПОЛ, БЪЛГАРИЯ**

<http://mtf70.tu-sofia.bg>

СЪДЪРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНИ ДОКЛАДИ	23
<i>Георги ПОПОВ</i>	
РЕКОНФИГУРИРАЩОТО СЕ ПРОИЗВОДСТВО – ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВО ЗА 21-ВИ ВЕК	25
<i>Kostadin KOSTADINOV</i>	
HYDRO-MINTS APPROACH FOR DEVELOPMENT OF ROBOTIC SYSTEM FOR MICRO & NANO BIOMEDICAL APPLICATIONS	39
<i>Stefan DIMOV</i>	
NOVEL MANUFACTURING PLATFORM FOR SCALE UP PRODUCTION OF MINIATURIZED PARTS	49
<i>Krassimir MARCHEV</i>	
PLASMA SURFACE ENGINEERING AND NANO-TECHNOLOGIES	51
МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ НА МАТЕРИАЛИТЕ	53
<i>Димитър БУЧКОВ, Венцеслав ТОШКОВ</i>	
ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛИ И ИНСТАЛАЦИИ, РАЗРАБОТЕНИ И ВНЕДРЕНИ ОТ НАУЧНОИЗСЛЕДОВАТЕЛСКАТА ЛАБОРАТОРИЯ „ЕФТТОМ“ КЪМ ТУ-СОФИЯ	55
<i>Венцеслав ТОШКОВ</i>	
КЪМ ТЕРМОДИНАМИЧНОТО ПРЕСМЯТАНЕ НА РАВНОВЕСИЯТА В ДИАГРАМАТА НА СЪСТОЯНИЯТА “ЖЕЛЯЗО – АЗОТ”	71
<i>Roumen PETROV, Leo KESTENS</i>	
CHARACTERIZATION OF ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL VIA ELECTRON BACKSCATTER DIFFRACTION	77
<i>Владимир ЩЪРБАКОВ</i>	
ВЪЗДЕЙСТВЕ НА ВТОРИЧНИТЕ ОТДЕЛЯНИЯ ВЪРХУ МИКРОСТРУКТУРАТА И СВОЙСТВАТА НА АЛУМИНИЕВА СПЛАВ 7075	83

Иван ГЕОРГИЕВ, Ангел ВЕЛИКОВ, Серъожа ВЪЛКАНОВ, Сергей СТАНЕВ, Явор БОЙЧЕВ	
СРАВНИТЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ЦЕНТРОБЕЖНО И СТАЦИОНАРНО ЛЕТА ЦИНКОВА СПЛАВ ZnAl10	91
Спилко ХУБЕНОВ, Георги СТОИЛОВ	
ФОТОГРАМЕТРИЧНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПРЕДЕЛНИТЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ЗАГУБА НА УСТОЙЧИВОСТ НА ПЛАСТИЧНОТО ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ НА ЛИСТОВ МЕТАЛ	97
Савина ДЕМИРОВА	
КОРОЗИЯТА В ТРЪБИТЕ И ОТОПЛИТЕЛНИ ИНСТАЛАЦИИ	103
ФАКТОРИ ЗА НЕЙНОТО РАЗВИТИЕ И ВЪЗМОЖНИ МЕРКИ ЗА ЗАЩИТА	
<i>Elena LYUBCHENKO, Svetlana AKSYONOVA</i>	
INFLUENCE OF NANO-PARTICLE ADDITIVE TO LUBRICANT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FRICTION SURFACES OF BEARINGS	107
Александър ЖЕЛЕВ, Теодор ОСИКОВСКИ	
ОТНОСНО РОЛЯТА НА РЕФЕРЕНТНИТЕ ИЗИСКВАНИЯ ПРИ ОСИГУРЯВАНЕ КАЧЕСТВОТО В ЗАВАРЪЧНОТО ПРОИЗВОДСТВО	113
Александър ГЕЧЕВ, Манахил ТОНГОВ	
МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ДЪГА ПРИ ВИГ ЗАВАРЯВАНЕ	119
<i>Igor PAPUSHKIN, Darina KAISHEVA, Gizo BOKUCHAVA, Peter PETROV</i>	
EVALUATION OF RESIDUAL STRESS AND MICROSTRAIN IN ELECTRON BEAM WELDED GEAR WHEEL BY NEUTRON DIFFRACTION	131
Крум ПЕТРОВ, Рандел РАНГЕЛОВ	
АНОДНА ЗАЩИТА НА ВИНТ ЗА ЯХТА	137
Ангел ВЕЛИКОВ, Сергей СТАНЕВ, Анна МАНЕВА, Крум ПЕТРОВ	
ПРОГНОЗИРАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНИТЕ ПРОМЕНИ ПРИ ПОЛУЧАВАНЕ НА ОТЛИВКА СЪС СЛОЖНА КОНФИГУРАЦИЯ ПО МЕТОДА „ГАЗОВО ПРЕСОВАНИЕ“	141

Международна научна конференция „70 години МТФ“

11-13 Септември, 2015, Созопол, България

MODELING OF THE PROCESSES IN THE ELECTRIC ARC DURING TIG WELDING

eng. Alexander GECHEV, prof. dr. eng. Manahil TONGOV
Technical university – Sofia, Faculty of industrial technology, Bulgaria

Abstract: This work presents a mathematical model of an electric arc during TIG welding. The solution is in cylindrical coordinate system by combining electrical, thermal and fluid mechanics. The protective gas is argon with information about the thermodynamic and fluid characteristics covering the temperature range 293.15- 22000 K, the electrode is made out of tungsten and the workpiece is a disc made of S355 EN 10025 with a database covering the required temperature range. The submitted solution of the problem is stationary. In the work are presented the results of the fluid velocity, temperature and electrical fields in the pillar of the electric arc.

Keywords: thermal processes, fluid processes, electrical processes, arc welding, TIG.

МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСИТЕ В ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА ДЪГА ПРИ ВИГ ЗАВАРЯВАНЕ

инж. Александър ГЕЧЕВ, доц. д-р инж. Манахил ТОНГОВ
Технически университет – София, Машинно – технологичен факултет, България

Резюме: В настоящата работа е представен математически модел на електрическа заваръчна дъга при ВИГ заваряване. Решението е в цилиндрична координатна система чрез съчетаване на електрическа, топлинна и флуидна задачи. Защитният газ е аргон с информация за термодинамични и флуидни характеристики покриващи температурния диапазон 293.15- 22000 K, електрода е волфрамов а детайла е диск изработен от материал S355 EN 10025 с база данни покриващи нужния температурен диапазон. Представено е стационарно решение на проблема. В работата са представени резултати за скоростите на флуида, температурното и електрическо полета в стълба на дъгата.

Ключови думи: топлинни процеси, флуидни процеси, електрически процеси, електродъгово заваряване, ВИГ.

1 ВЪВЕДЕНИЕ

Електродъговото заваряване като метод за съединяване на метални детайли чрез стопяване е стара технология. Този производствен процес обаче е все още под интензивно развитие, с цел по-нататъчно подобряване на различни аспекти като производителност, контрол на процеса и качество. Такива подобрения са полезни от икономическа и екологична гледна точка. Процесът на електродъгово заваряване е сложен за моделиране, тъй като включва много големи температурни градиенти, интензивно излъчване на стълба на дъгата, процеси в анодната и катодната области и др. Характеристиките на материалите, участващи в процеса силно зависят от температурата, което води до висока нелинейност на решаваните задачи. Дълго време изследването му е било базирано на експериментални методи и аналитични решения за определени частни случаи. Днес благодарение на значителния напредък направен в сферата на изчислителната техника и използването ѝ за числените методи за моделиране на заваръчния процес, експериментите могат да бъдат допълнени, за да се

достигне до по-дълбоко познаване на процеса. Такъв пример е промяната на микроструктурата на материал с определено термично натоварване [1], намиране на остатъчните напрежения и деформации [2]. Електрическата заваръчна дъга представлява газов разряд между анод и катод. При моделирането на електрическата заваръчна дъга се очертават два подхода, които се различават главно по начина на моделиране на процесите в стълба на дъгата. Първият от тях се характеризира с това, че се моделират топлинни, електрически и електромагнитни процеси в стълба на дъгата, като се използват термодинамичните характеристики на газовата среда [3]. В този случай обикновено се решават термична и електрическа задача и се отчита електромагнитното излъчване. Особеността на вторият подход е, че се моделират процесите на йонизация на взаимодействие на електрони, иони и атоми в стълба на дъгата [4]. Тези два подхода за моделиране на стълба на дъгата респективно водят до различия при моделирането на процесите в електродните области.

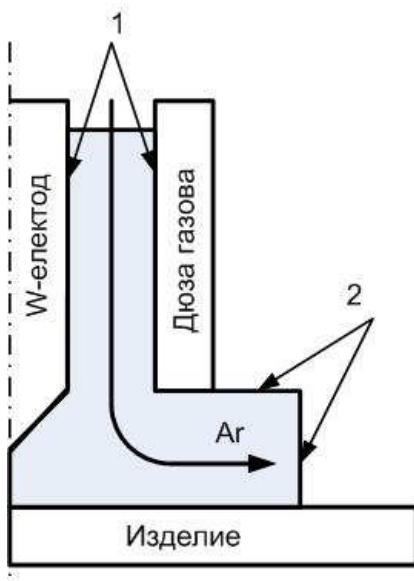
Целта на настоящият доклад е да се предложи модел на електрическата заваръчна дъга в условията на ВИГ заваряване.

2 МОДЕЛ

При моделирането на електрическата заваръчна дъга разглеждаме главно процесите в стълба на дъгата и в електродните области. Нагряването на волфрамовия електрод от протичащия ток и взаимодействието му със стълба на дъгата е също така необходимо заради процесите в катодната област. По същият начин е необходимо да се моделира и нагряването на заваряваното изделие за описание на процесите в анодната област. Процесите в заваръчната вана няма да бъдат моделирани и не са цел на настоящият доклад. Това означава, че във волфрамовия електрод и заваряваното изделие следва да се разглеждат процеси на топлопренасяне и протичане на електрически ток. В стълба на дъгата в резултат на протичащия ток протичат процеси на йонизация, дейонизация и нагряване. В същото време непрекъснатото подаване на защитен газ се отразява върху топлинните процеси в стълба на дъгата. В резултат на високата температура и частичната йонизация на защитния газ стълбът на дъгата е източник на интензивно електромагнитно излъчване, водещо до неговото охлаждане. Нагряването на стълба на дъгата се реализира главно от протичането на електрически ток по закона на Джоул. В катодната област се извършва емисия на електрони като токът на емисия е лимитиран в съответствие с уравнението на Ричардсон [5]. Емисията на електрони води до охлаждане на повърхностния слой на електрода като мощността на този източник се определя от енергията за еmitиране и плътността на тока. В резултат на привличането на иони от катода се формира катодният пад на напрежението. Топлинната мощност, която се отделя в зоната на катодния пад на напрежението води до нагряване на йонизирания газ и катода. В анодната област също се наблюдава пад на напрежението, който е свързан с потенциала на йонизация на защитната среда (в случая Ar). Този пад на напрежението също води до отделяне на топлина на енергия. Електроните навлизящи в анода отдават своята енергия, зависеща от енергията за емитиране, като го нагряват. По такъв начин в стълба на дъгата трябва да бъдат моделирани процесите на движение на флуида, протичане на електрически ток, отделяне на топлина, топлопренасяне и електромагнитно излъчване.

2.1 Флуидна задача

За описание на движението на флуида (фиг.1) се използват уравнението на Нави-Стокс (без отчитане на сили разпределени по обема) и уравнението за непрекъснатост на флуида:



Фиг.1. Движение на флуида

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (2)$$

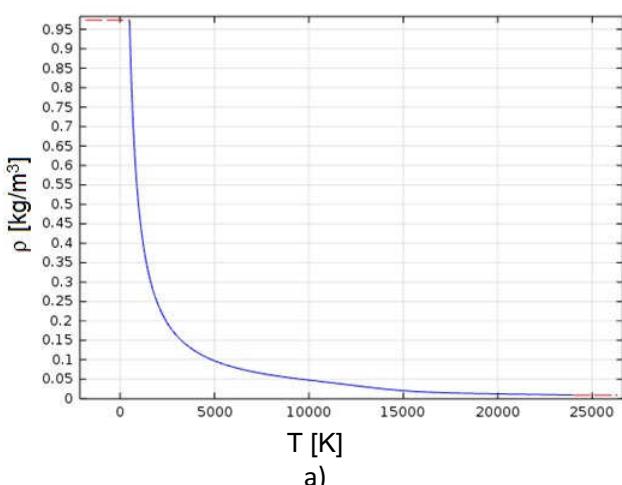
където u е вектор на скоростта;

p – налягане;

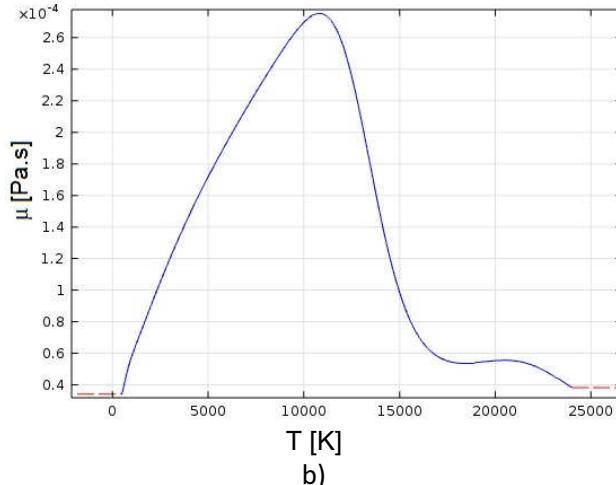
ρ – плътност;

μ – динамичен вискоzитет.

Характеристиките на материала, влизати в тези две уравнения са плътността и динамичният вискоzитет. На фиг. 2 са показани зависимостите на тези величини от температурата. По границите 1 (фиг.1) е зададено гранично условие ограничаващо движението на флуида, а по границите 2 – налягане 1 [atm]. Флуидът е дефиниран като свиваем. Както е показано на фигурата аргонът постъпва в горният край на изследваната област като е зададен дебит 6 [l/min].



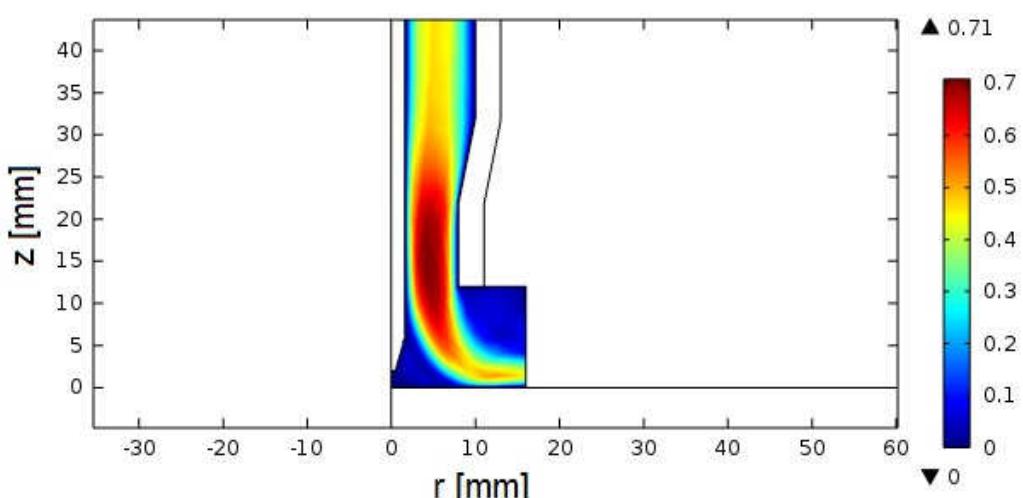
a)



b)

Фиг.2. Зависимост на плътността на аргона (a) и динамичния вискоzитет (b) в зависимост от температурата

Моделирано е първоначалното продухване с аргон и са установени скоростите на флуида преди възбудждането на заваръчната дъга (фиг.3)



Фиг.3. Разпределение на скоростите в защитната среда в края на процеса на продухване, [m/s]

2.2 Електрическа задача

Тъй като в рамките на решаваната задача няма вътрешни източници на електрически ток в разглежданите обеми и не се отчита взаимодействието на тока със собственото му магнитно поле то електрическото поле се описва с уравненията.

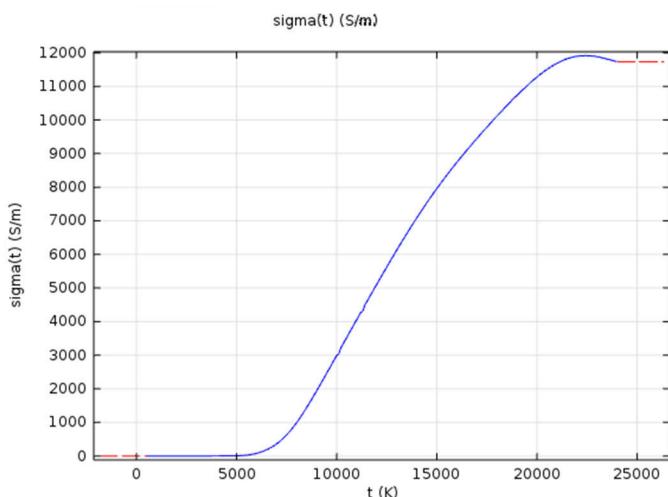
$$\frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = 0 \quad \vec{j} = \sigma \cdot \text{grad}(\varphi) \quad (3)$$

където j е плътността на тока;

σ – проводимост на средата;

φ - потенциал на електрическото поле.

Проводимостта на аргона, волфрама и материалът на изделието зависят от температурата. Използваната зависимост на електрическата проводимост на аргона от температурата е показана на фиг.4.



Фиг. 4. Електрическа проводимост на аргона в зависимост от температурата, [3]

результат на термоелектронната емисия е:

$$j_{TE} = AT^2 \exp\left(-\frac{\Phi_C}{k_B T}\right) \quad (4)$$

където Φ_C е работата за емилиране на електрони от катода;

A – квантов коефициент, за W е 0.7 [A/(mm².K²)];

k_B – константа на Болцман.

Пълната емисионна способност на катода е

$$I_{TE} = \int_S j_{TE} dS \quad (5)$$

Хипотезата, която е използвана в настоящата работа е, че по повърхността на катода се реализира еднаква част от емисионната способност. Това означава, че заваръчният ток е

$$I_W = \alpha I_{TE} \rightarrow \alpha = I_W / I_{TE} \quad (6)$$

Плътността на тока през повърхността на катода е:

За електрическата задача се задава големината на заваръчния ток и се дефинира заваряване на права полярност. По повърхността на анода и катода са зададени анодният и катоден пад на напрежението. Експериментите показват, че сумата на анодният и катоден пад на напрежението при ВИГ заваряване е в границите 9÷11[V] [6]. Анодният пад при заваряване на стомани е 6÷8[V]. Емисията на електрони от катода е ограничена като е използван повърхностен слой с относително електрическо съпротивление Емисионната способност на катода в

$$j_C = \alpha \cdot j_{TE} = j_{TE} \frac{I_W}{I_{TE}} \quad (7)$$

Разглеждайки слой с дебелина δ ($\delta \sim 0.01[\text{mm}]$) и площ dS може да запишем:

$$U_C = j_C dS \cdot \rho_s \frac{\delta}{dS} = j_{TE} \frac{I_W}{I_{TE}} \rho_s \delta \quad (8)$$

По такъв начин за относителното електрическо съпротивление на повърхностния слой получаваме:

$$\rho_s = \frac{U_C}{\delta \cdot I_W} \frac{I_{TE}}{j_{TE}} \quad (9)$$

2.3 Топлинна задача

За решаването на тази задача се използва уравнението на топлопроводността, като в рамките на електрода и изделиято има следния вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (10)$$

При разглеждане на процесите в газовата среда следва да се отчита скоростта на флуида и в този случай уравнението на топлопроводността се представя по следния начин:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q \quad (11)$$

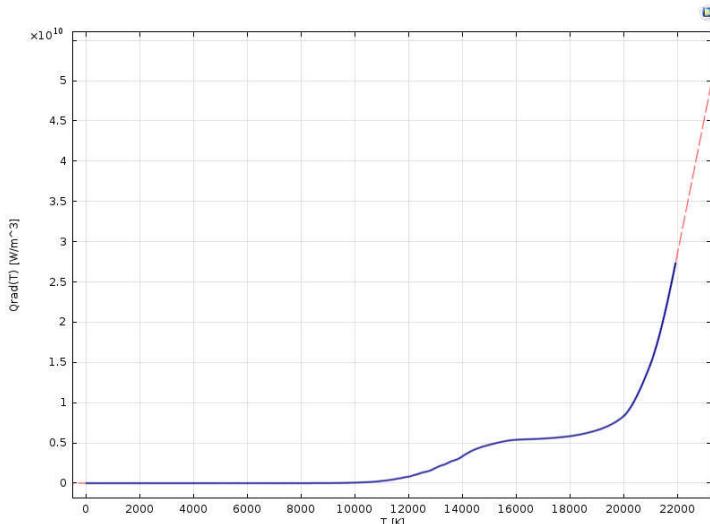
Където C_p – топлинен капацитет при постоянно налягане;

k – коефициент на топлопроводност;

u – вектор на скоростта;

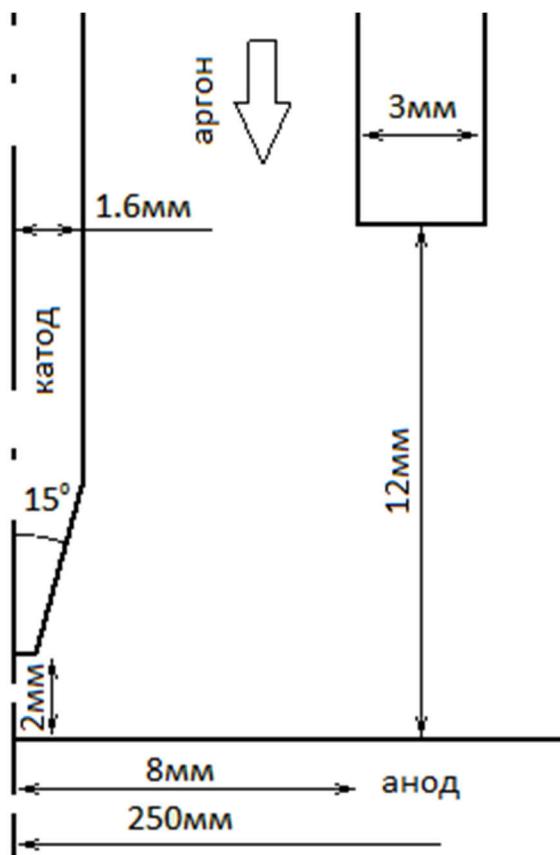
Q – разпределен обемен източник на топлина – в случая топлинната мощност, отделяна по закона на Джоул.

Мощността, която се отделя в анодната област има две съставящи. Отделяната мощност в аргона е $j \cdot U_A$, а отделяната мощност в изделиято е $j \cdot (\Phi_A + 2k_B T) / q_e$. Аналогично в катодната област се отделя мощност в аргона ($j \cdot U_C$), а самият катод се охлажда с мощност $j \cdot (\Phi_C + 2k_B T) / q_e$. Тези топлинни източници са разположени съответно по повърхността на анода и катода. Нагретият аргон излъчва енергия, при което се охлажда. Тази енергия е показана на фиг.5.



Фиг. 5

Налага се използването на такава голяма дебелина, защото изделието и дъгата са неподвижни, а се търси стационарно решение на задачата. Резултатите, посочени в тази работа са за заваръчен ток 80[A]. За по-лесно, както ръчно така и автоматично, решаване на варианти с различни изходни данни задачата е параметризирана както по отношение на геометрията така и по отношение на участващите физични величини.



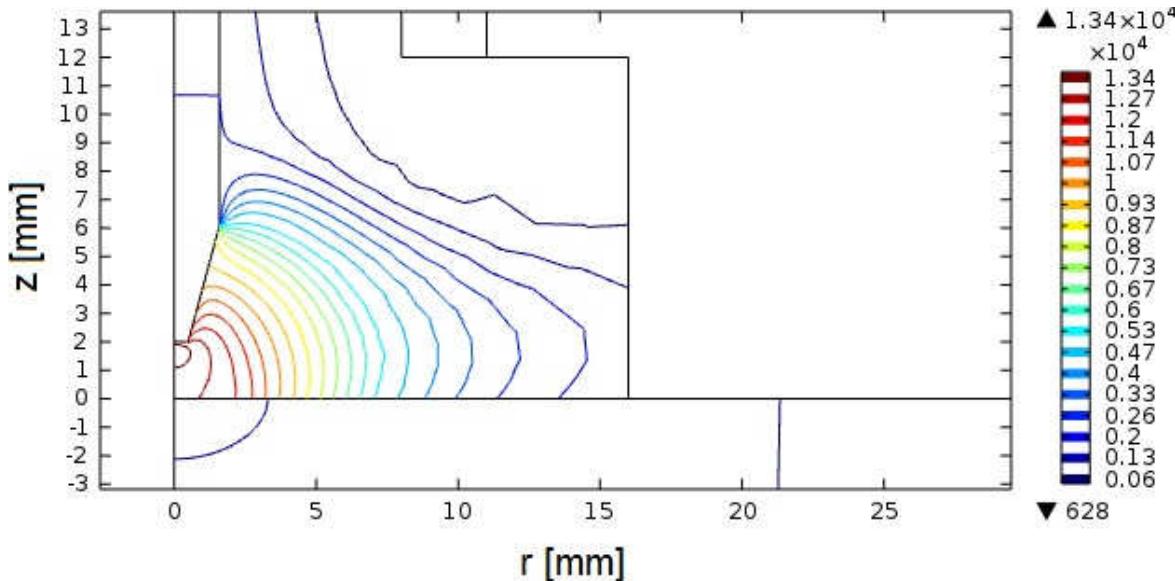
Фиг.6. Схематично представяне на геометрията

2.4 Формулиране на задачата.

Използваната геометрия на задачата за моделиране и симулиране на процеса е показана на фиг.6. Задачата се решава в цилиндрична координатна система, като са обединени разгледаните по-горе физични формулировки. Посочената газова дюза е керамична и участва единствено в топлинната задача. В горната част на електрода, който обикновено е водоохлаждаем е зададена константна температура. В разглеждания случай изделието е с диаметър 250[mm] и дебелина 15[mm].

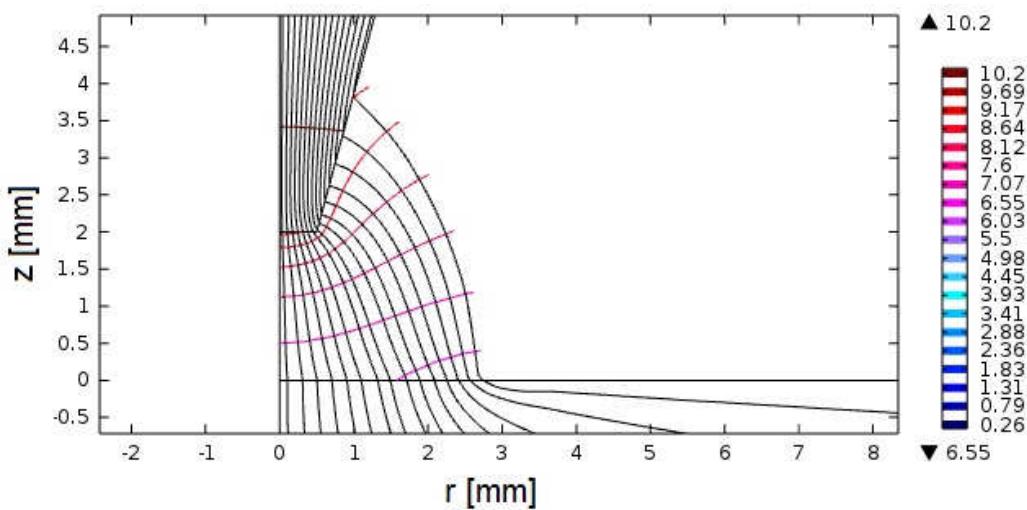
3 РЕЗУЛТАТИ

Температурното поле в дъгата е представено чрез изотермични повърхнини (фиг.7), а електрическото поле еквипотенциални повърхнини и токови линии (фиг.8).

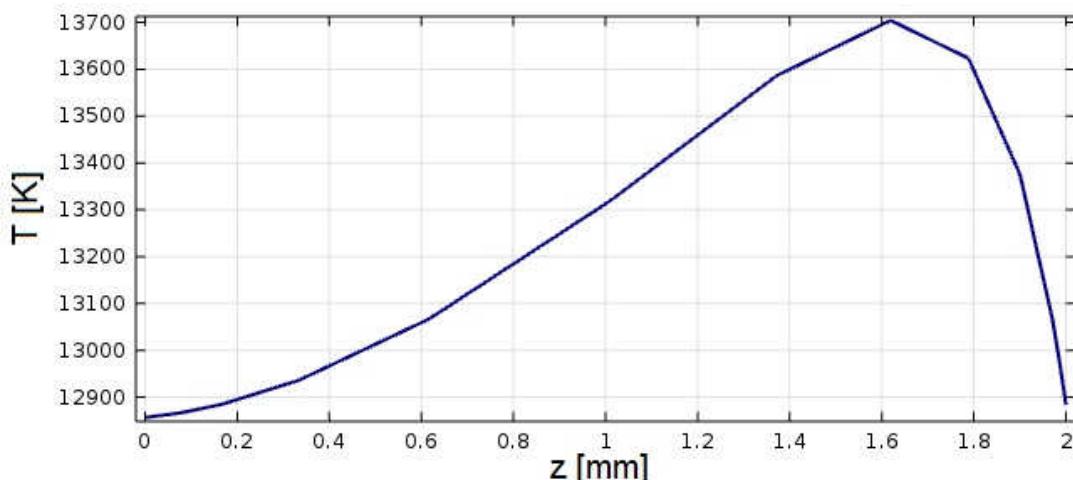


Фиг.7. Температурно поле в дъгата

Непосредствено под електрода се достигат най-високите температури (13400K) и плътност на тока $25[\text{A/mm}^2]$, като изключим тази в електрода. В самият електрод плътността достига $37[\text{A/mm}^2]$. Промяната на температурата по оста на дъгата е показана на фиг.9. Падът на температурата в близост до електрода се дължи на охлаждащото му действие.

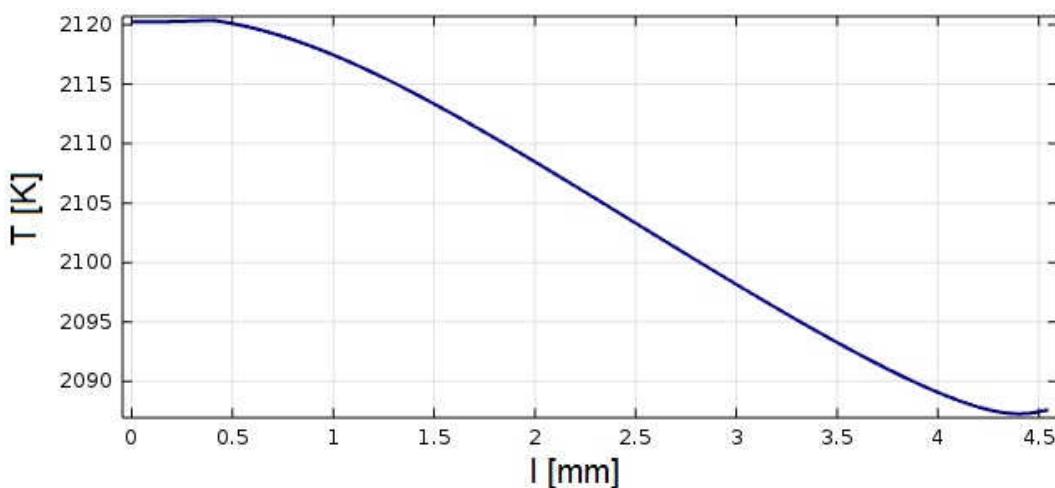


Фиг.8. Еквипотенциални повърхнини $V[\text{V}]$ и токови линии

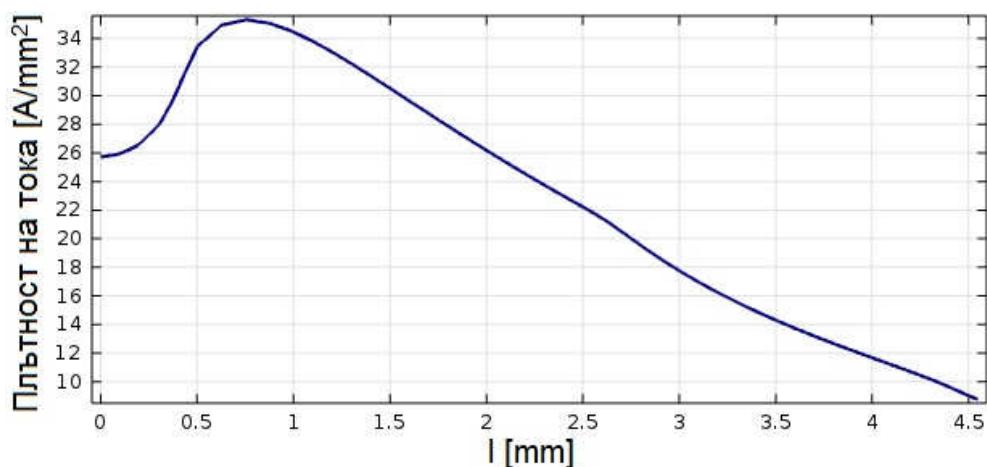


Фиг.9. Температурно поле в дъгата

Разпределението на температурата по повърхността на катода е показано на фиг.10. Тази температура определя емисионната способност на катода. На фиг.11 е показана плътността на тока през повърхнината на волфрамовия електрод.

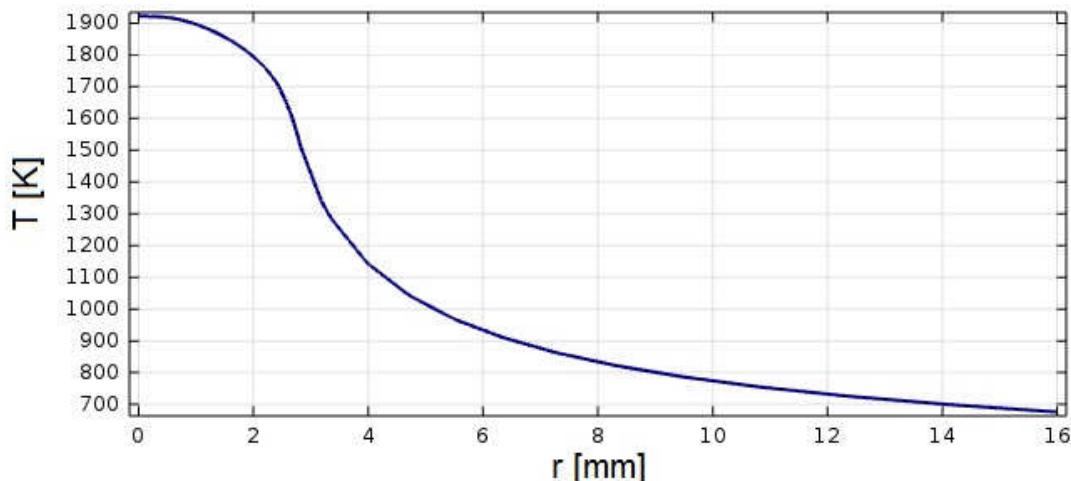


Фиг.10. Разпределение на температурата по повърхността на катода



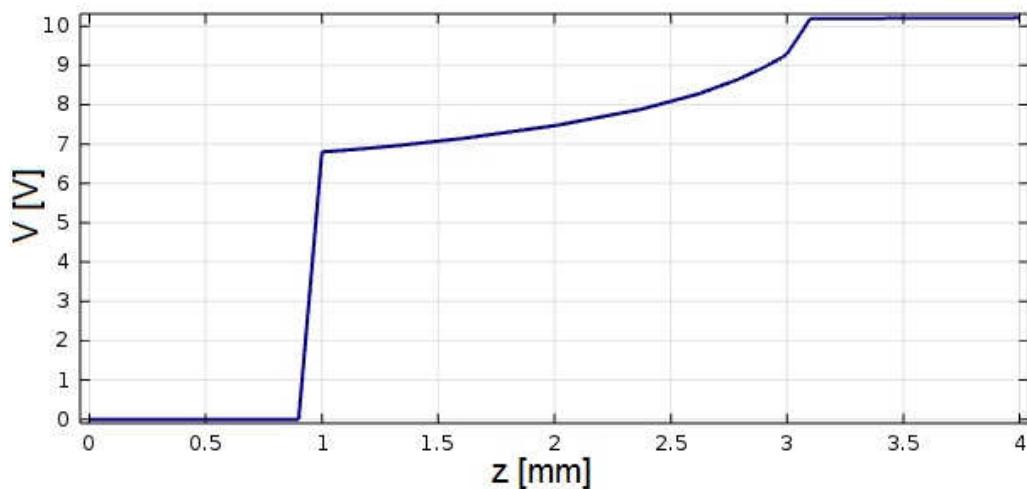
Фиг.11. Плътност на тока през повърхнината на електрода

На фиг.12 е показано разпределението на температурите по повърхността на анода.



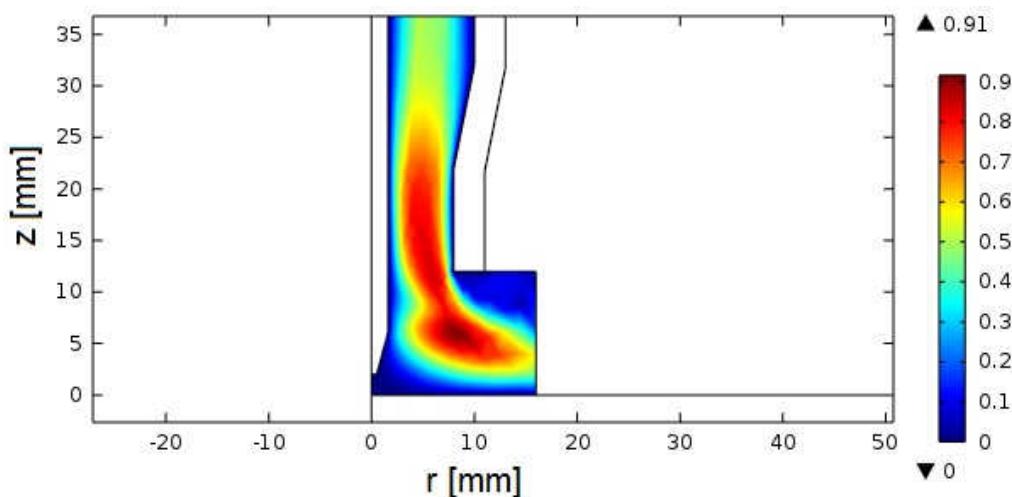
Фиг.12. Разпределение на температурите по повърхността на анода

Падът на напрежението по оста на симетрия е показан на фиг.13. Добре се виждат анодният и катоден пад на напрежението. Това, което прави впечатление е, че градиентът на потенциала нараства с приближаване към катода.

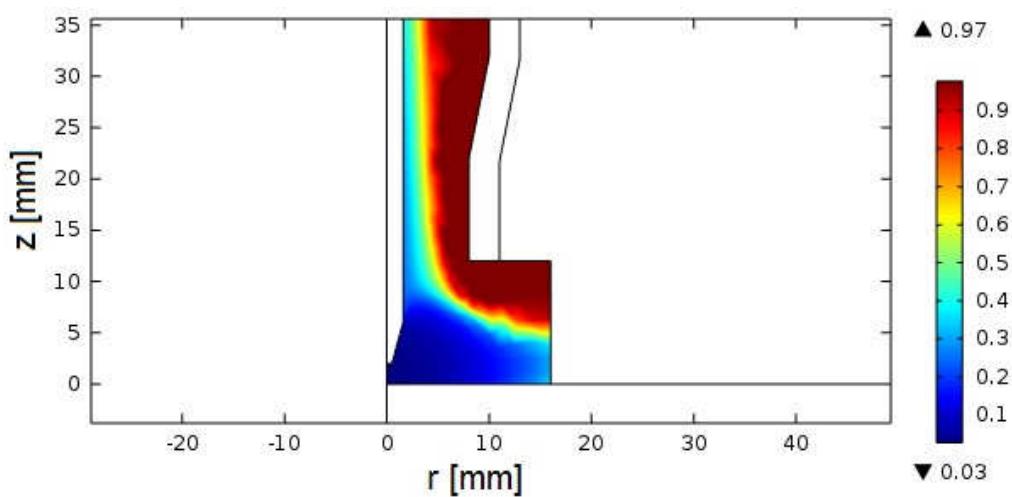


Фиг.13. Пад на напрежението по оста на симетрия

Промяната на температурното състояние на аргона се отразява както на полето на скоростите (фиг.14) така и на неговата плътност (фиг.15).



Фиг.14. Поле на скоростите



Фиг.15. Плътност на аргона

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделът на електрическата дъга включително и описанието на катодната и анодната област при ВИГ заваряване е в състояние да предскаже пада на напрежението, плътността на тока, температурното поле и поведението на флуида при различна големина на тока. Резултатите получени от модела са в добро съгласие с литературни данни в тази област. Възможно е по отделно да се изследва пада на напрежението в катодната, анодната област и стълба на дъгата.

Изследвания с модела до момента са направени за показаните материали и геометрия. Забелязва се изкривяване на токовите линии на върха на катода в следствие на геометрията му, което води до повишаване на плътността на тока (фиг.11). По нататъчни изследвания ще бъдат насочени към определяне на влиянието на дължината на дъгата и формата на електрода върху характеристиките на дъгата.

БЛАГОДАРНОСТИ

Трудът е създаден с подкрепата на договор № 152ПД0025-05 финансиран от НИС при Технически университет – София

ЛИТЕРАТУРА

1. Lindgren, L., B. Babu, C. Charles, and D. Wedberg (2010). Simulation of manufacturing chains and use of coupled microstructure and constitutive models. Finite Plasticity and Visco-plasticity of Conventional and Emerging Materials, Khan, A. S. and B. Farrokh, (red.). NEAT PRESS, 4 s.
2. Kumar, A. and T. DebRoy (2007). Heat transfer and fluid flow during Gas-Metal-Arc fillet welding for various joint configurations and welding positions. The minerals, metals and materials society and ASM International.
3. Isabelle Choquet, Håkan Nilsson, Sass-Tisovskaya, M. (2009). Plasma arc welding simulation with OpenFOAM, Licentiate Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
4. D. Uhrlandt, M. Baeva, A. V. Pipa, R. Kozakov, G. Gött (2014). Cathode fall voltage of TIG arcs from a non-equilibrium arc model. Published online: 14 August 2014
5. Tashiro Shinichi, Tsujimura Yoshihiro, Tanaka Manabu. Numerical model with arc length variation of welding arc with constant voltage power source. Transactions of JWRI, vol.41 (2012), No.1.
6. Сварка в машиностроении. том 1. под. ред. Олшанского, М. Машиностроение, 1978

КОРЕСПОНДЕНЦИЯ

доц. д-р инж. Манахил Тонгов

Тел: 02/653475

E-mail: tongov@tu-sofia.bg

маг. инж. Александър Гечев

Тел: 02/653475

E-mail: a_gechev@abv.bg