

Международна научна конференция „70 години МТФ“ 11-13 Септември, 2015, Созопол, България

MODELING OF RESISTANCE SPOT WELDING PROCESS

Manachil TONGOV

Abstract: Modeling of resistance spot welding process is discussed and methodology for determining of parameters is presented.

Key Words: welding, spot welding, modeling.

МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ТОЧКОВО ЕЛЕКТРОСЪПРОТИВИТЕЛНО ЗАВАРЯВАНЕ

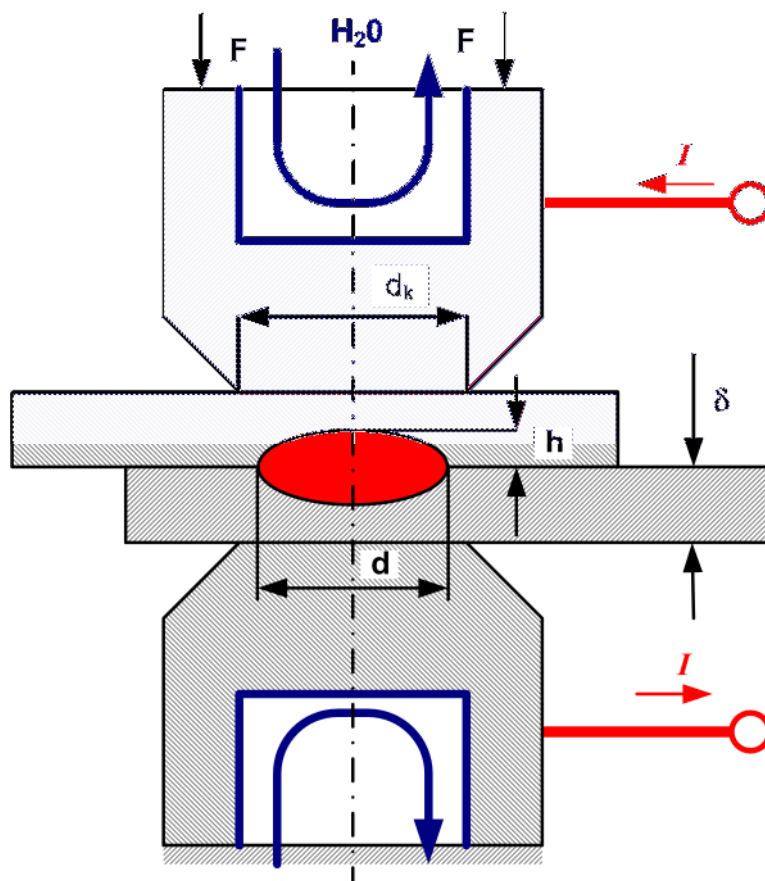
Манахил ТОНГОВ

Резюме: Разгледано е математическото моделиране на процеса на точково електросъпротивително заваряване и е предложена методика за определяне на параметрите на режима.

Ключови думи: заваряване ЕСЗ точково моделиране.

1. ФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ ПРИ ФОРМИРАНЕ НА СЪЕДИНЕНИЕТО

Схемата на процеса на точково електросъпротивително заваряване (ЕСЗ) е показана на фиг.1. Реализирането на технологичния процес предполага осъществяването на натиск върху заваряваните детайли и пропускането на електрически ток през тях. Тези два процеса се осъществяват чрез електродите от заваръчната машина. Основните процеси, които протичат са: микропластична деформация в зоните на контакта както между електродите и детайлите така и между детайлите; макропластична деформация в зоната на съединяване; нагряване на детайлите и електродите от протичащия ток; разпространяване на топлината в детайлите и електродите; топлоотвеждане през свободните и принудително охлаждаеми повърхнини; термично разширяване и последващо свиване в резултат на термичния цикъл; разбъркване на течния метал в резултат на взаимодействие на протичащия ток със собственото му магнитно поле; еластична и евентуално пластична деформация на заваряваните детайли в случаят когато първоначално между тях не е установен добър контакт. При разглеждането на процесите на ЕСЗ под микропластична деформация се разбира деформацията в зоната на контакта и в рамките на грапавостта на контактуващите повърхнини. Както теоретично така и експериментално е доказано, че тя има място само в началото на процеса. Тази деформация оказва влияние върху контактните електрическо и топлинно съпротивления в зоната на контакта. Под макропластична деформация се разбира деформацията в заваряваните детайли, която води и до формирането на уплътняващия пръстен около зоната на стопяване (заварената точка) и предпазва течният метал от взаимодействие с компонентите на въздуха (главно кислорода). Температурата в контакта между електродите и детайлите не трябва да достига високи стойности за да не се понижат механичните характеристики на материалите в тази област. Други причини за ограничаване на температурата в тези контакти са износването на електродите и преноса на метал от електрода към заваряваните детайли – тези два процеса се стимулират от повишаването на температурата. За предпазване на електродите от прегриване обикновено се използва водно охлаждане. Нагряването на детайлите и формирането на течна фаза се постига чрез отделяне на топлина по закона на Джаул и зависи от относителното електрическо съпротивление и плътността на тока (ρj^2). В рамките на процеса разпределението на плътността на тока се променя, а в началото му съществено влияние оказва контактното съпротивление между заваряваните детайли. В зависимост от баланса на топлоотвеждането в детайлите и електродите зоната на термично влияние може да има различна форма и размери. Това се отнася и за заварената точка (лялото ядро), което при меки режими (обикновено с продължителност над 0.1[s]) има форма близка до елипсоид. Разбъркването на течната фаза оказва влияние на процеса на кристализация и на разпределението на евентуалните замърсявания попаднали в лялото ядро от повърхността на заваряваните детайли. По такъв начин за правилното реализиране на процеса е от съществено значение синхронът между процесите на нагряване и пластична деформация. Това означава, че при моделирането на процеса е важно да се отчита влиянието на температурата върху топлофизичните, електрическите и якостни характеристики на заваряваните метали.



Фиг. 1. Схема на процеса

Параметрите на режимите при точково ЕС3 се задават под формата на таблици (табл.1 [1], табл.2 [2]) и циклограми (фиг.2 [2]), в които е посочен вида на циклограмата и стойностите на тока, притискащата сила и продължителността на действие на дадения фактор. Диаметърът на лятото ядро (d) и дълбочината на провара (h) се регламентират в стандарта – за посочените дебелини те са: при дебелина 1[mm] – $d=4^{+1}$ [mm] и $h=0.5^{+0.1}$ [mm], а при дебелина 3[mm] – $d=9^{+1.5}$ [mm] и $h=1.5^{+0.2}$ [mm].

Таблица 1. Параметри на режима за точково ЕС3 на нисковълглеродни стомани.

δ [mm]	dk [mm]	режим с малък натиск						режим с голям натиск					
		F [Kgf]		tw* [ms]		Iw [KA]		F [Kgf]		tw [ms]		Iw [KA]	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
0.4÷0.6	4	90	115	50	70	4	6	133	183	40	50	5	8
0.6÷0.8		125	133	70	100	5	7	175	204	60	80	6	9
0.8÷1.0	5	140	150	90	120	6	8	194	265	70	100	7	10
1.0÷1.2		163	183	110	150	7	9	255	326	80	120	8	12
1.2÷1.6	6	194	214	140	180	8	11	306	408	90	130	10	13
1.6÷2.0	7	256	296	180	220	9	13	398	527	100	140	12	15
2.0÷2.5	8	347	377	220	280	10	15	510	632	120	160	14	18
2.5÷3.0	9	449	479	280	350	12	17	612	765	150	200	17	20

*Продължителността на импулса е зададена в брой полупериоди при честота 50 [Hz].

Сравнявайки данните от двете таблици можем да се убедим, че режимите се различават съществено (табл.3). Освен това параметрите на режимите са в широки граници (табл.1). От физична гледна точка параметрите, определящи лято ядро с определени размери са два – продължителността на импулса и големината на тока, което означава, че могат да бъдат реализирани различни режими, осигуряващи необходимата енергия. От друга страна големината на натиска оказва влияние върху контактното съпротивление. В същото време стандарта предписва, а и узаконяването на заваръчната процедура изисква след като бъде реализиран режимът на заваряване да бъде проверена якостта на съединението чрез изпитване на опън. Геометрията на полученото съединение се проверява чрез металографски

анализ. Това означава, че минимизирането на провежданите експерименти за проверка на процедурата е от съществено значение за намаляването на разходите. Поради тези причини моделирането на процеса може да доведе до съществено поевтиняване и ускоряване на разработването на заваръчните процедури.

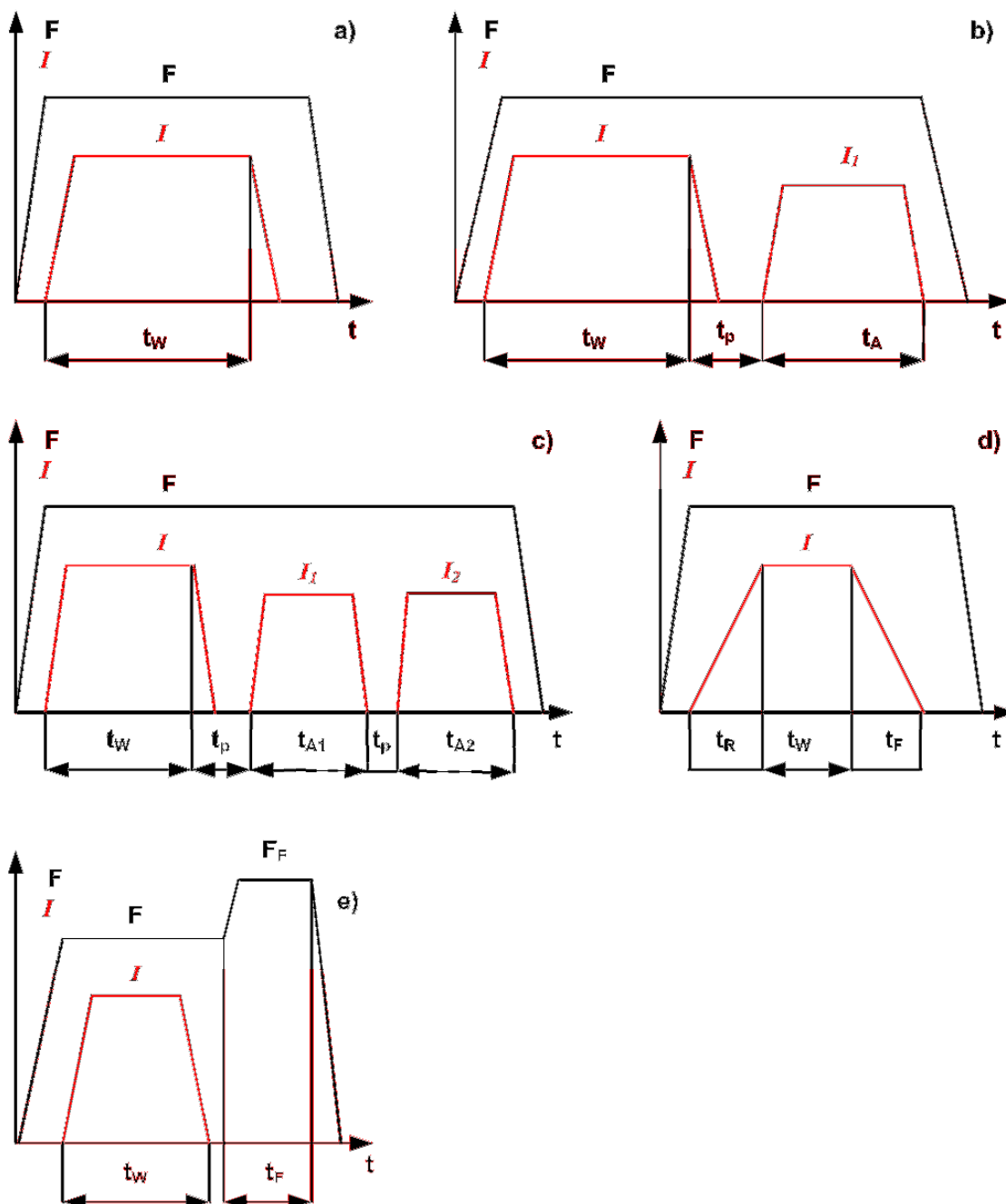
Таблица 2. Параметри на режима за точково ЕСЗ на различни стомани.

група на материала	Материал	дебелина	циклограма	j [A/mm ²]	p_3 [MPa]	t_3 [ms]	p_k [MPa]	t_k [ms]
1	въглеродна стомана (S235)	1+1	a	700	220	140	-	-
		3+3	b÷e	200	150	260	300	60
2	легирана стомана (40NiCrMo6)	1+1	b, d	510	360	460	-	-
		3+3	c÷e	214	180	1300	380	180
3а	високо легирана стомана (XCrNiTi-18-9)	1+1	a	415	390	160	-	-
		3+3	e	166	200	330	420	60

Забележки:

а) $I_3 = j_3 \cdot S$; $F_3 = p_3 \cdot S$; $F_k = p_k \cdot S$; $S = \pi d^2/4$

б) Данните са за електроди със сферична, но могат да се използват и при плоска контактна повърхнина.



Фиг. 2. Основни циклограми за точково ЕСЗ

Таблица 3. Сравняване на режимите при дебелина на заваряваните детайли 3+3 [mm]

Параметър	Режим с малък натиск	Режим с голям натиск	Параметризиран режим
Заваръчен ток [kA]	17	20	12,7
Притискаща сила [N]	4700	7504	9542
Продължителност на импулса [ms]	350	200	260

2. МАТЕМАТИЧЕСКО ОПИСАНИЕ НА ФИЗИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ

Моделирането на процеса на точково ЕСЗ, разгледано в този доклад, включва решаването на система уравнения, описващи топлопренасянето, протичането на електрически ток и еластично и пластично формоизменение в зоната на заваряване. За численото решаване на задачата се използва МКЕ.

2.1. Моделиране на топлопренасянето в заваряваните детайли и електродите.

Топлопренасянето в детайлите и електродите се описва от диференциалното уравнение (ДУ) на топлопроводността. В случая на неподвижна среда уравнението има следния вид:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_j + Q_{jc} \tag{1}$$

- където ρ е плътността на материала;
- C_p – специфичен топлинен капацитет;
- k – коефициент на топлопроводност;
- Q_j – отделяна топлинна мощност от протичащия ток;
- Q_{jc} – отделяна топлинна мощност от протичащия ток в зоната на контакта.

Тъй като температурата се променя в широки граници тези и всички други характеристики на материалите ще се използват като температурозависими. Граничните условия отчитат както топлообмена между електродите и охлаждащата ги вода така и между свободните повърхнини и обкръжаващият ги въздух. Освен това поради факта, че част от свободните повърхнини са нагreti до високи температури се отчита радиационното излъчване от тях. Самите контактни области имат определено термично съпротивление, което зависи от степента на реализираната деформация. Отделяната топлинна мощност от протичащия ток се определя по формулата:

$$Q_j = \frac{1}{s} j^2; \quad Q_{jc} = \left(\frac{1}{s} \right)_{add} j^2 \tag{2}$$

- където $1/s$ е относителното електрическо съпротивление на материала;
- s – електрическа проводимост;
- $(1/s)_{add}$ – допълнителното относително електрическо съпротивление, свързано с контактното съпротивление;
- j – плътност на електрическия ток (модул на вектора на плътността на тока).

2.2. Моделиране на протичането на електрически ток.

Тъй като в рамките на решаваната задача няма вътрешни източници на електрически ток и не се отчита взаимодействието на тока със собственото му магнитно поле то:

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

- където φ е потенциалът на електрическото поле.

Аналогично на топлинната задача контактните електрически съпротивления зависят от напредналостта на деформационния процес. Те имат решаващо значение за разпределението на генерираната топлина в началната фаза на процеса. Граничните условия се свеждат до задаване на нулев потенциал на долната повърхнина на долния електрод и големина на тока през горната

повърхнина на горния електрод. Всички останали външни повърхнини се разглеждат като електрически изолирани.

За моделиране на контактните съпротивления има предложени различни методики [3-5]. Те се базират на нормалния натиск между контактуващите повърхнини и микротвърдостта на материала с по-малка микротвърдост. Някои от методиките дават възможност да се работи и с твърдостта по Бринел [5]. Други методики [8] предлагат функции, които позволяват напасване към конкретни условия. Във всички случаи получените формули зависят от направените предположения относно геометрията на неравностите, техните статистически разпределения и механизма за формиране на контакта. В повечето случаи тези методики са приложими когато зоната на грапавината не е обхваната изцяло от пластична деформация. По тази причина те винаги дават контактни съпротивления по-големи от нула при това без да се отчита, че α -петната не покриват цялата повърхнина на контакта. В настоящата работа е използвана методика, която отчита обемната и микропластична деформация в зоната на контакта. Ролята на повърхностните замърсявания и фактическата площ на α – петната се отчита с коефициент, определян на базата на експериментални данни. Методиката ще бъде описана в отделна статия. Има и редица изследвания [8-14], насочени към експерименталното определяне на контактното съпротивление и характеристиките на получаваните съединения, резултатите от които могат да бъдат използвани при определяне на параметрите необходими за моделиране на процеса.

2.3. Моделиране на деформационните процеси.

Чрез симулирането на деформационните процеси се решава задачата за напреженията, деформациите и преместванията в разглежданата област. Задачата фактически се решава в премествания. Векторът на преместванията има компоненти u , v и w по осите x , y и z . Използвайки означенията:

$$u = u_1 \quad v = u_2 \quad w = u_3 \quad x = x_1 \quad y = x_2 \quad z = x_3 \quad (4)$$

за компонентите на тензора на деформациите се получава:

$$\varepsilon_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

Като се използват константата на Ламе (λ), модулът G и означението:

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (6)$$

за компонентите на тензора на напреженията може да се запише:

$$\sigma_x = \lambda e + 2G \frac{\partial u}{\partial x} \quad \sigma_y = \lambda e + 2G \frac{\partial v}{\partial y} \quad \sigma_z = \lambda e + 2G \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\tau_{ij} = G \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3; i \neq j \quad i \neq j \quad (7)$$

В обема на детайлите и електродите системата уравнения има вид:

$$\begin{aligned} (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial x} + G \nabla^2 u + X &= 0 \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial y} + G \nabla^2 v + Y &= 0, \\ (\lambda + G) \frac{\partial e}{\partial z} + G \nabla^2 w + Z &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

където X, Y и Z са компонентите на обемната сила (в случая са нули при пренебрегване на силата на тежестта).

По границите на разглежданата област уравненията имат вида

$$\bar{X} = \left[\lambda e + 2G \frac{\partial u}{\partial x} \right] . l + G \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) . m + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) . n \right] \quad (9)$$

където \bar{X} е компонентната на повърхностната сила по оста x ;

l, m и n – направляващи косинуси на съответната повърхнина по осите x, y и z .

В разглеждания случай гранично условие със зададена сила се използва само за горната повърхнина на горния електрод. Долната повърхнина на долния електрод се задава като неподвижна, т.е. там преместванията ще са нули. Температурното разширяване се отчита като се определя деформацията в резултат на реализираното нагриване, която се добавя към деформацията получена на базата на преместванията преди изчисляване на напреженията.

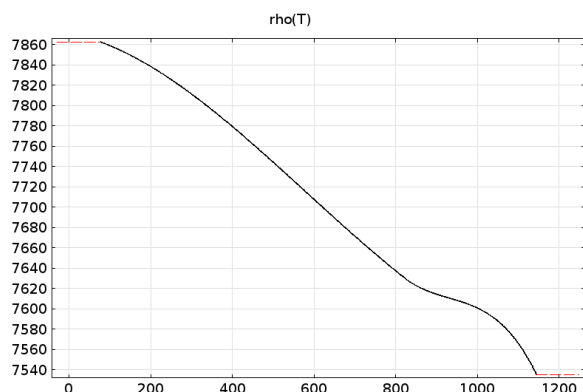
При достигане на границата на провлачане на материала напреженията остават равни на текущата стойност. Тази стойност зависи от деформацията и кривата на уякчаване. Допълнителното добавено уравнение на практика представлява ограничение за напреженията по Мизес от уякчаването на материала.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МАТЕРИАЛИТЕ

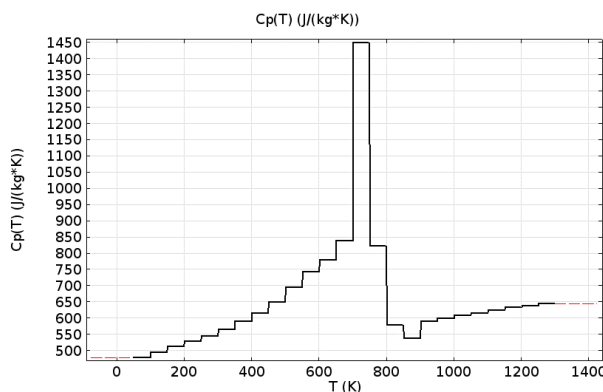
Всички характеристики на материала са силно повлияни от температурата. Имайки предвид системата ДУ, която трябва да се решава може да се отчете, че се получава задача с висока нелинейност. Влиянието на температурата не може да бъде пренебрегнато поради достиганите при реализиране на процеса високи температури и градиенти на температурата. Тъй като основната цел на тази статия е разработването на методика за определяне на параметрите на режима чрез моделиране на процеса използваните характеристики на материалите не се отнасят за определена марка стомана.

3.1. Топлофизични характеристики.

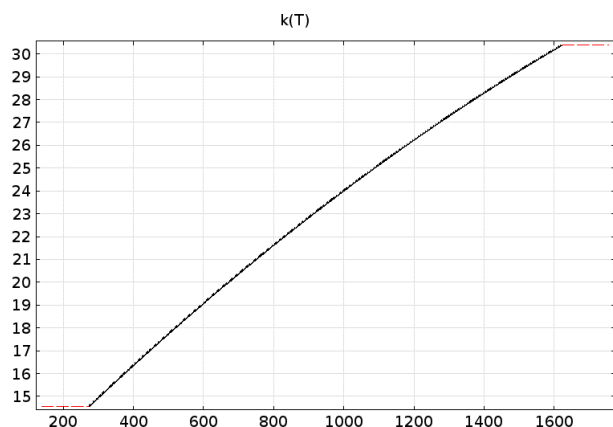
Температурната зависимост на характеристиките на материала, които влизат в уравнение (1) са дадени на фиг.3.



а) плътност



б) специфичен топлинен капацитет



в) коефициент на топлопроводност

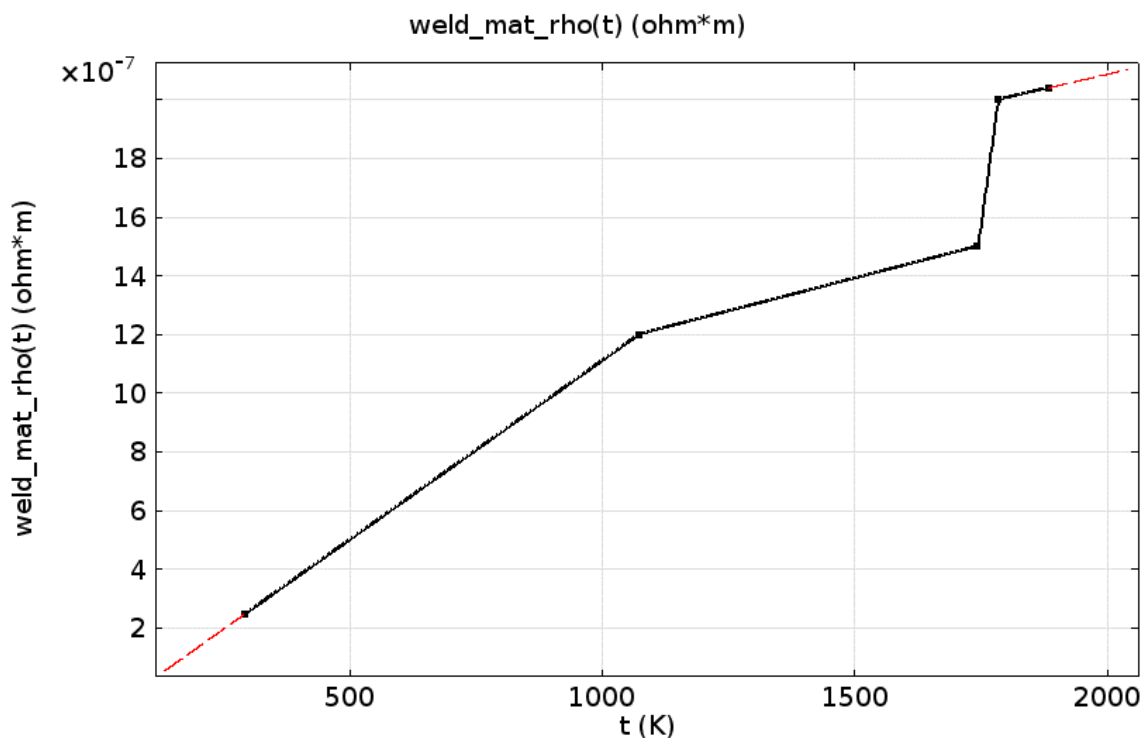
Фиг.2. Топлофизични параметри

3.2. Електрически характеристики.

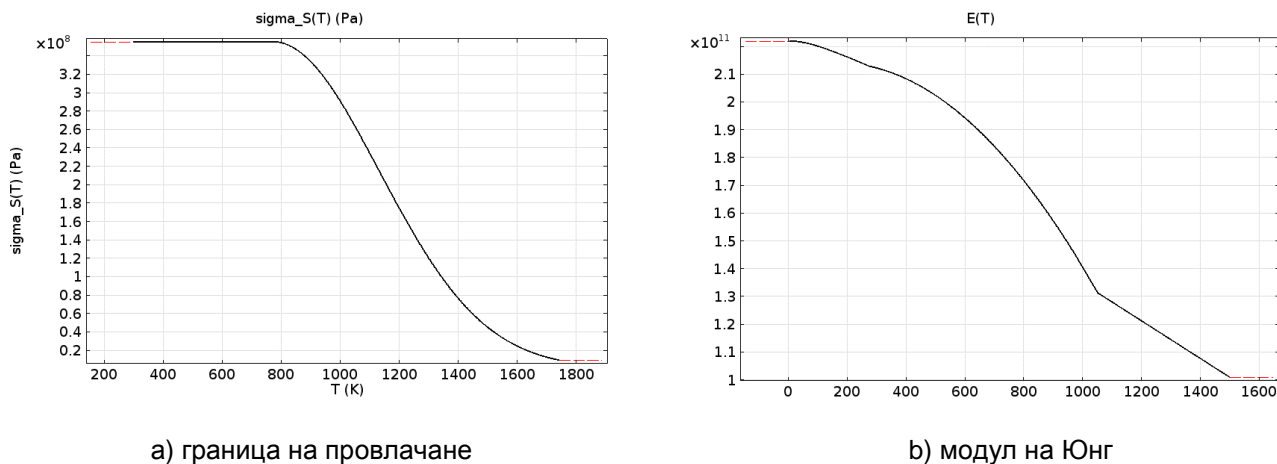
Относителното електрическо съпротивление е зададено в съответствие с фиг.3 [2]. То нараства с температурата, като при навлизане в аустенитната област се променя наклонът на кривата и има скок, свързан с промяната на агрегатното състояние.

3.3. Якостни и деформационни характеристики.

На фиг.4 са показани температурните зависимости на границата на провлачане и модулът на Юнг, използвани за решаването на задачата. Коефициентът на Поасон също е представен с температурната си зависимост.



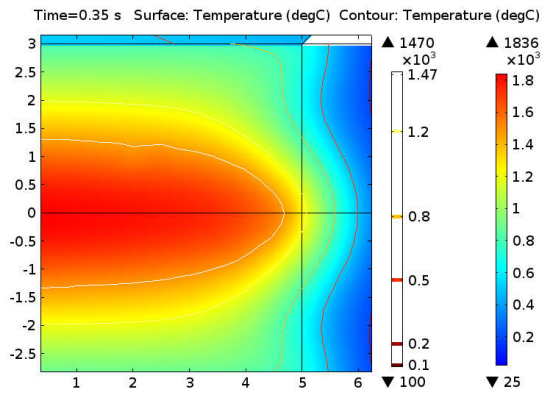
Фиг. 3. Зависимост на относителното електрическо съпротивление от температурата



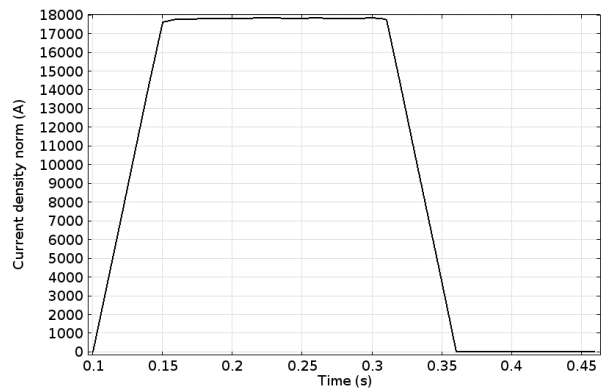
Фиг.4. Якостни характеристики

4. РЕЗУЛТАТИ

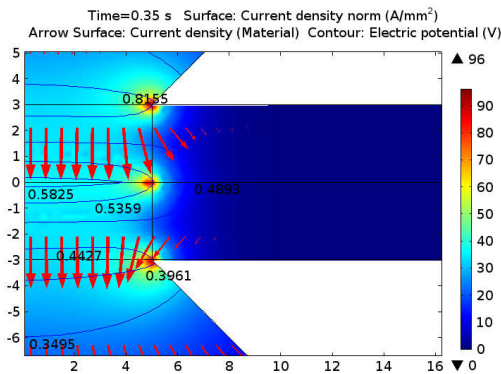
Развитието на температурното и електрическо поле във времето е определящо за формирането на завареното съединение. На фиг.5 са показани разпределението на температурите и изотермите за температури, важни за процесите в ЗТВ, в края на процеса на нагряване. Може да се отчете, че в случая формата на лятото ядро (по изотермата за температурата на солидуса) не се различава от типичната елипсовидна форма за меките режими. Фиг. 6 показва формата на тока през контакта между горният електрод и горният детайл. Определена е чрез интегриране на плътността на тока по тази равнина. На фиг.7 са представени полето на електрическия потенциал и плътността на тока в края на токовия импулс. Най-голяма плътност на тока се получава по линията в края на контакта на електрода с детайла и в същата вертикална равнина в контакта между двата детайла. В този момент стойността на тока вече е ниска. Развитието на плътността на тока в контролните точки е показано на фиг.8. Точката, която е под края на електрода се характеризира с най-голяма плътност на тока, която достига 440[A/mm²] при средна плътност на тока в контакта електрод – детайл 230[A/mm²].



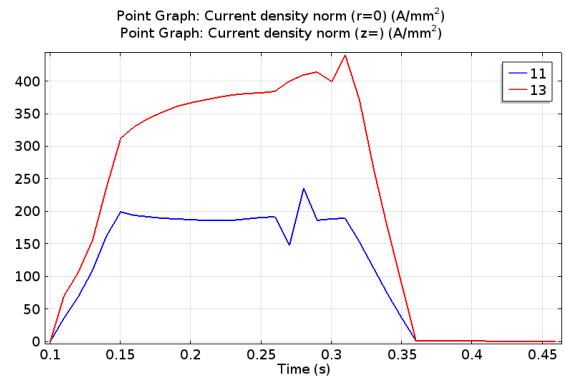
Фиг. 5. Температурно поле в края на процеса на нагряване



Фиг. 6. Развитие на тока във времето



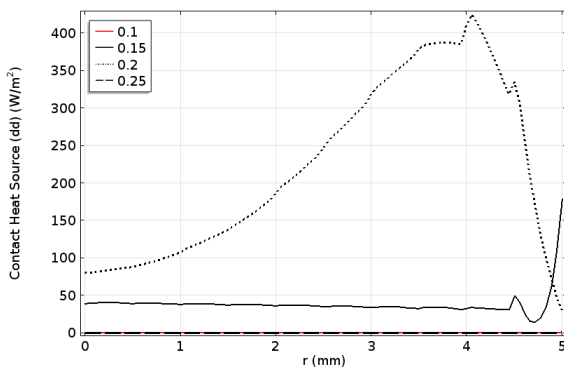
Фиг. 7. Поле на електрическия потенциал и плътност на тока в края на процеса на нагряване



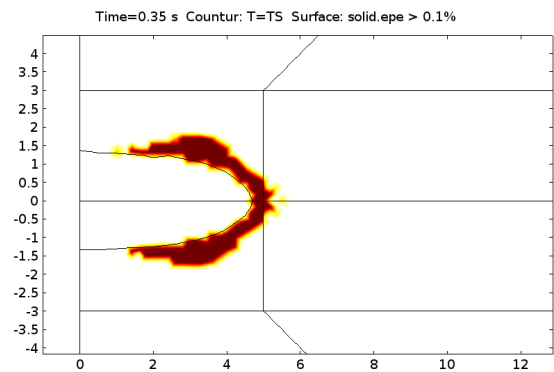
Фиг. 8. Промяна на плътността на тока във времето за точката по оста на съединението (11) и точката под края на електрода (13) в контакта детайл - детайл.

Отделяната топлина върху контактното съпротивление детайл – детайл има изключително важна роля за топлинния баланс при образуване на съединението. На фиг.9 е показана отделяната топлинна мощност в различни моменти от времето. Вижда се, че с напредване на процеса тя минава през екстремум и 0.18[s] след началото на токовия импулс става равна на нула.

За правилно протичане на процеса е важно да се оформи така нареченият уплътнителен пръстен. Това е пластично деформиран метал, който уплътнява съединението и възпрепятства изплискването на течния метал в пространството между детайлите. На фиг.10 е показана изотермата на солидуса и зоната обхваната от пластична деформация надвишаваща 0.1%.



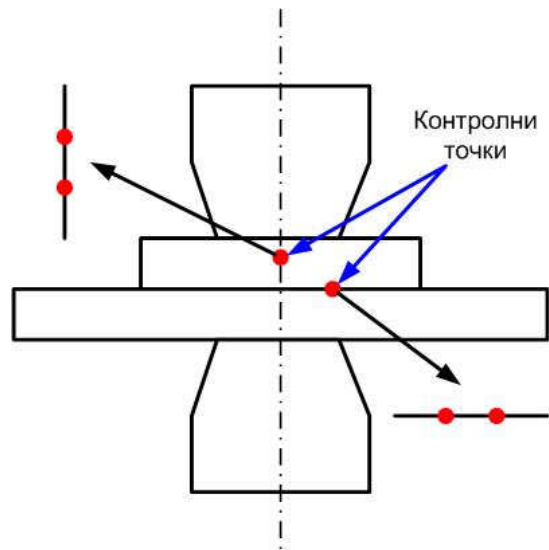
Фиг. 9. Отделяна топлинна мощност в контакта детайл – детайл



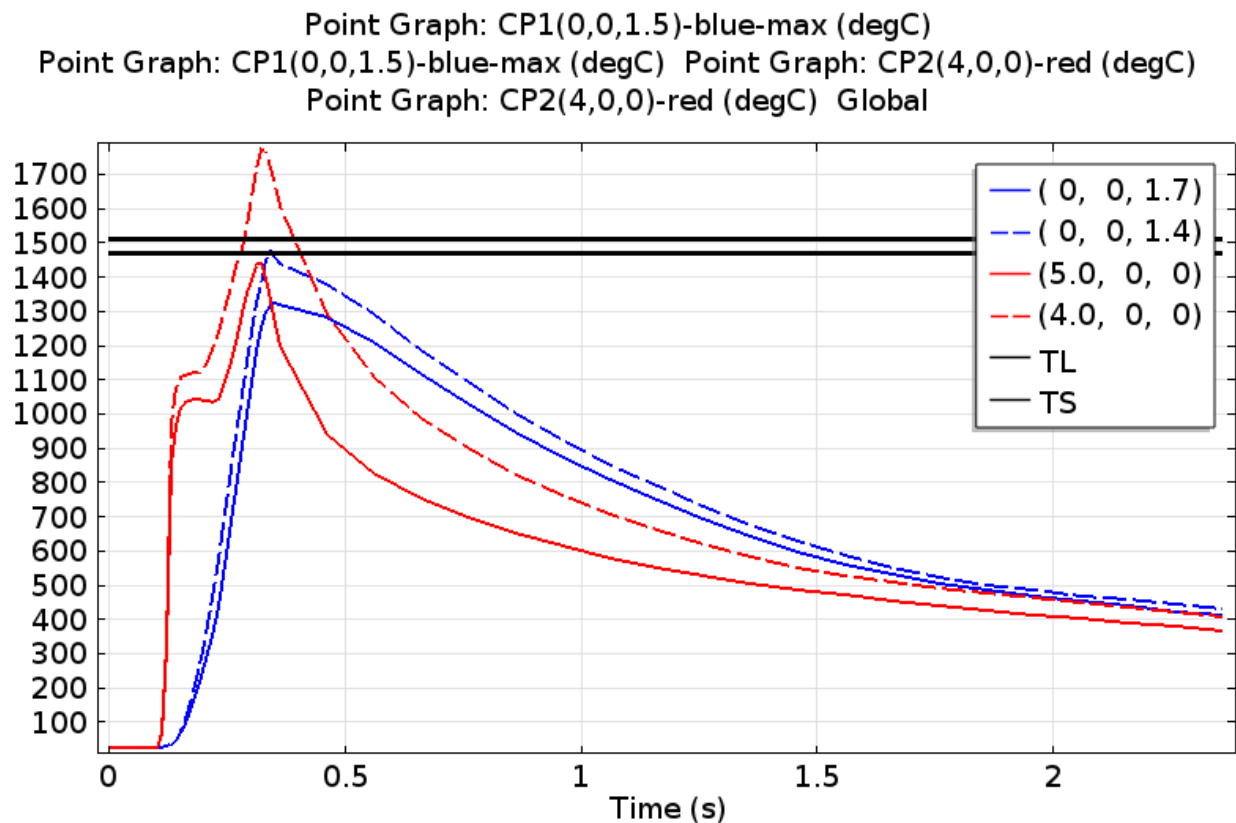
Фиг. 10. Уплътнителен пръстен в края на процеса на нагряване

5. МЕТОДИКА ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА РЕЖИМА

Определянето на подходяща комбинация на големината на тока и продължителността на токовия импулс при равни други условия се извършва на базата на контролни точки (фиг.11). Те определят размера на лятото ядро в радиална и вертикална посока и имат определени допустими отклонения. Това означава, че по време на заваряване фронтът на топене трябва да достигне интервала, лимитиран от двойката точки в съответната посока. В разглеждания случай точките, определящи радиалния размер на ядрото имат координати по оста r съответно 4 и 5 [mm]. Координатите на точките, определящи вертикалния размер на ядрото, са съответно 1.4 и 1.7 [mm]. На фиг.12 са показани температурните цикли за контролните точки. Резултатът е постигнат при продължителност на токовия импулс 260[ms], големина на тока 18[KA] и сила на притискане 11.8[KN]. Вижда се, че това е един от възможните режими за реализиране на съединението. Може да се покаже, че и други комбинации на големината на тока и продължителността на импулса могат да дадат необходимият резултат.



Фиг. 11. Контролни точки за формиране на лятото ядро



Фиг. 12. Температурни цикли в контролните точки

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана е една възможност за моделиране на процеса на точково електросъпротивително заваряване и предложена методика за определяне на параметрите на режима. В същото време трябва да се подчертае, по-доброто моделиране на този процес неминуемо преминава през необходимостта от отчитане на силовата част на заваръчната машина. Индуктивността на вторичния контур, начинът на управление на тока и типът на машината неизбежно водят до промени във формата на тока през

заваряването съединение. Това от своя страна се отразява върху процесите на нагряване и пластично деформиране. Всичко това може да бъде обект на следващи разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. BS 1140 : 1993 Resistance spot welding of uncoated & coated low carbon steel.
2. Орлов Б.Д., Ю. В. Дмитриев, А. А. Чакалев, В. А. Сидякин, А. Л. Марченко, Технология и оборудоване контактной сварки, М. Машиностроение, 536 с., 1975.
3. Yarong WANG, Jicai FENGY and Zhongdian ZHANG. Influence of Surface Condition on Expulsion in Spot Welding AZ31B Magnesium Alloy, J. Mater. Sci. Technol., Vol.21 No.5, 2005
4. J.H. Han, P. Shan, Sh.S. Hu. Contact analysis of fractal surfaces in earlier stage of resistance spot welding, Materials Science and Engineering A 435–436 (2006) 204–211
5. P.S. Wei, T.H. Wu. Electrical contact resistance effect on resistance spot welding, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 3316–3324
6. M. Galler, N. Enzinger, C. Sommitsch, The estimation of the contact interface temperature during resistance spot welding of zinc coated steels using numerical technique. 2010 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
7. M. Rashid^{1,2}, J. B. Medley² and Y. Zhou Nugget formation and growth during resistance spot welding of aluminium alloy 5182,
8. Ta-chien Sun, M.A., FUNDAMENTAL STUDY OF CONTACT RESISTANCE BEHAVIOR IN RSW ALUMINUM, DISSERTATION, The Ohio State University, 2003
9. Mian Mohsin Irshad, TECHNIQUE FOR MEASUREMENT OF WELD RESISTANCE FOR AC RESISTANCE SPOT WELDING VIA INSTANTANEOUS PHASOR MEASUREMENT, *University of Western Ontario - Electronic Thesis and Dissertation Repository*. Paper 796
10. Quanfeng Song, Testing and Modeling of Contact Problems in Resistance Welding, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 2003
11. W. F. SAVAGE, E. F. NIPPES AND F. A. WASELL, Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, *Welding Journal* FEBRUARY 1978 43-s÷50-s
12. P. Tashev, Y. Lukarski, R. Merdjanov, A. Tasev “Measurement of the clamping effort in resistance welding of crossed wires” (Mjerenje sile pritiska kod elektrootpornog zavarivanja križnih spojeva žica), 40 MEDUNARODNA KONFERENCIJA HDTZ “ZAVARIVANJE – WELDING 2014”, Šibenik, SOLARIS, 28. - 31. 05. 2014., ISBN 978-953-7518-03-5, pp. 69-76
13. П. Ташев, М. Манилова, Р. Лазарова, Д. Градинаров, С. Годоров, „Анализ на микроструктурата на електросъпротивително заварени кръстови съединения от арматурна стомана“, Четвърта национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност ’2014“, 23 – 24 октомври 2014 г., София
14. Ташев П., Я. Лукарски, А. Тасев, Г. Павлов, М. Атанасов, „Получаване на електросъпротивително заварени кръстови съединения от стоманена тел и арматурна стомана“, ISSN 1312-5702, Инженерни науки, год. L, 2014, № 4, списание на отделение „Инженерни науки“ към Българска Академия на Науките, стр. 58-67

КОРЕСПОНДЕНЦИЯ

доц. д-р Манахил ТОНГОВ
 ТУ-София, София 1000 бул. „Кл. Охридски“ №8
 e-mail: tongov@tu-sofia.bg