



Influence of the Asymmetry of the Defect on the Parameters of the Thermal Spot by Infrared Diagnostic

Ivanka PETROVA, Emil MIHAILOV

University of Chemical Technology and Metallurgy, Sofia, Bulgaria,
e-mails: petrovaivanka09@gmail.com; emilgmihailov@gmail.com

Abstract

The presence of internal defects in the fire resistant bricks, tensions and damages that occurred as a result of repair operations and cyclic heat exchanges result in local destruction of the fire resistant insulation in individual sections. For the purpose, predictive models have been developed, calculating the expected heat and operational qualities and condition, and therefore forecasting the life of the insulation materials. During the study for establishing the impact between the defect parameters and surface temperature field in case of damages forming in the heat insulation of the steel pouring ladle, a symmetric and asymmetric defect has been previewed with the shape of straight triangle prism.

Keywords: Infrared thermovision, Mathematical modelling, Metallurgical ladle, Damage Detection and Diagnosis, Symmetrical and asymmetrical defect

Влияние на асиметричността на дефекта върху параметрите на горещото петно при инфрачервена диагностика

Иванка ПЕТРОВА, Емил МИХАЙЛОВ

Увод

Огнеупорната изолация на високотемпературните агрегати в металургичната промишленост е подложена на влиянието на термичните напрежения и химическото и физическо въздействие на течния метал, довеждайки до нейното износване, увеличаване на топлинните загуби и до влошаване на топлообмена. Разрушаването на изолацията е опасно и може да засегне структурната цялост на агрегатите[1-2].

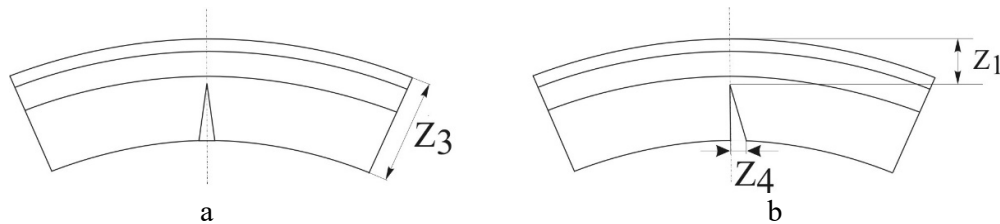
През последните години инфрачервените камери[3-6]се наложиха като перфектно решение за мониторинг на високотемпературното оборудване по време на неговата работа. Измерването на температурата[7] и анализирането на резултатите позволява да се предотвратят аварии от пробив и разрушаване и да се избегнат последствията, свързани с допълнителни и извънредни разходи, загуби на метал, продължителни престои и др. Прилагането на безконтактните методи позволява повишаване на сигурността на работа и оптимизирането на замяната на огнеупорната зидария при оптимизиране на разходите.

Изследване

Наличието на вътрешни дефекти в огнеупорните тухли, напрежения и повреди, възникнали в резултат на ремонтните дейности и цикличните топлосмени довеждат до локално разрушаване на огнеупорната изолация в отделни участъци[8-10] За целта се разработват предсказващи модели, изчисляващи очакваните топлинни и

експлоатационни качества и състояние, а следователно и прогнозиращи живота[11] на изолационните материали.

При провеждане на изследването за установяване на влиянието между параметрите на дефекта и повърхностното температурно поле при повреди, формиращи се в топлинната изолация на стоманоразливна кофа е разгледан симетричен дефект с форма на права триъгълна призма. Когато този дефект се формира в резултат на термични напрежения, скрити дефекти или повреди от строителните дейности е възможно той да се прояви като несиметричен и по-нататъшното му развитие да продължи като такъв. Схематично представяне на дефекта в двата случая е визуализирано на фигура 1. Това поставя въпроса за влиянието на несиметричността на дефекта върху параметрите на повърхностното температурно поле, а оттам и върху стойностите на параметрите, използвани в диагностичните процедури за оценяване и определяне на размерите на дефекта, на базата на които се взема решение предсказващо поддържане.



Фигура 1. Схематично представяне на а – симетричен и б- несиметричен дефект.

За реализиране на поставените цели е използван разработения за подобни изследвания 3D математичен модел[12], в който е симулиран асиметричен дефект с размери, Z_1 , Z_2 , Z_3 и Z_4 идентични с тези на симетричния дефект. За провеждане на изследването е използван пълен факторен експеримент при който стойностите на Z_1 , Z_2 , Z_3 са изменяни на три нива, а размерът на Z_4 е постоянен с максималната допустима в практиката стойност. Границите на изменение на параметрите на дефекта са идентични с тези при провеждане на изследването за симетричен дефект, представляващ права триъгълна призма.

За провеждане на числената симулация на нестационарното топлинно състояние на стената на стоманоразливната кофа са използвани граничните условия[14], прилагани в изследванията за симетричен дефект.

От числената симулация са получени резултати за нестационарното топлинното състояние и свързаното с това температурно поле в стената на изследвания обект. Отчетени са изменението на температурата в областта на горещото петно и в бездефектната област на външната повърхност на стената на стоманоразливната кофа в момента на постъпването ѝ на резервна позиция на стенда за непрекъснато разливане. На базата на отчетените резултати е изследвано съответствието между стойностите на параметрите[13] за разгледаните конфигурации на дефекта и параметрите на горещото петно използвани в диагностичните процедури. В настоящата статия са използвани следните параметри на горещото петно:

- Максимална температура на горещото петно при симетричен и несиметричен дефект
- Температурен контраст между стойностите на максималната температура на горещото петно и температурата в бездефектната област

- Параметри на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно, които могат да бъдат използвани за определяне на височината на повредата и остатъчната дебелина на стената в областта на повредата при симетричен и несиметричен дефект:
 - Δh_{\max} – разстоянието между проекциите на минималната и максимална стойност на производната на температурния контраст по абсцисата на координатната система;
 - $\Delta T'_{\max}$ – разстоянието между проекциите на минималната и максимална стойност на производната на температурния контраст по ординатата на координатната система;
 - $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ – отношението между проекциите по двете оси на координатната система на минималната и максимална стойност на производната на температурния контраст.

Съответствието между стойностите на параметрите на горещото петно T_{\max} и ΔT_{\max} както и параметрите на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно: Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ са подложени на серия статистически изследвания, както следва:

- Определяне на средната абсолютна процентна грешка;
- Корелационен анализ;
- Проверка на хипотеза за равенство на дисперсиите на двете извадки;
- Проверка за равенство на средните;
- Регресионен анализ.

Резултати

В статията са разгледани подробно резултатите от статистическите изследвания при стойностите на максималната температура на горещото петно при симетричен и асиметричен дефект. Температурния контраст и параметрите на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно (Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$), са обобщени съответно за всяко едно от направените статистически изследвания.

Един от параметрите, на базата на които са изведени регресионни зависимости за оценяване на повредата е максималната температура на горещото петно.

Резултатите за максималната температура на горещото петно в момента на отчитане за симетричен и несиметричен дефект са представени в таблица 1, където:

$S(T_{\max})$ – максималната температура в горещото петно при симетричен дефект

$A(T_{\max})$ – максималната температура в горещото петно при несиметричен дефект

За оценяване на съответствието между резултатите от двете извадки е определена средната абсолютна процентна грешка **MAPE (mean absolute percentage error)**.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \frac{|S(T_{\max}) - A(T_{\max})|}{S(T_{\max})} 100$$

където n – е броят на опитите

Получените резултати са представени в таблица 2. От таблица 2 се вижда, че средната абсолютна процентна грешка за $T_{\max} = 0,052\%$. При получените резултати от средната абсолютна процентна грешка температурния контраст, както и параметри на

производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно, са : $\Delta T_c = 1,057\%$, за $\Delta h_{\max} = 1,8\%$, за $\Delta T'_{\max} = 1,03\%$, за $(\Delta T'/\Delta h)_{\max} = 1,51\%$

За оценка на съответствието между максималните стойности на температурите на горещо петно в областта на дефекта при симетрична и асиметрична форма е формулирана хипотеза за равенство на дисперсиите на двете извадки. Приемането или отхвърлянето на тази хипотеза е проверено статистически.

Проверяваната хипотеза за равенство е приета за основна (работна или нулева) и е означена с H_0 . Наред с хипотезата H_0 се разглеждана и хипотеза H_1 , която ѝ противоречи и е приета за алтернативна (конкурираща).

За проверка на нулевата хипотеза H_0 срещу алтернативната H_1 за ниво на значимост (доверие) – α , е използвана т.н. Р-стойност (p-value) или Р-ниво (p-level), която се прилага при определяне на статистическата значимост на резултатите от проверка на хипотези.

Таблица 1. Резултати за максималната температура на горещото петно при симетрична и асиметрична форма на дефекта.

Z3	Z3, m	Z2	Z2, m	Z1	Z1, m	S(Tmax), °C	A(Tmax), °C
1	0,28	1	0,3	1	0,15	370,16	370,23
1	0,28	1	0,3	0	0,11	398,96	398,91
1	0,28	1	0,3	-1	0,07	451,4	451,28
1	0,28	0	0,2	1	0,15	364,63	364,27
1	0,28	0	0,2	0	0,11	389,01	388,72
1	0,28	0	0,2	-1	0,07	435,87	435,58
1	0,28	-1	0,1	1	0,15	357,34	357,05
1	0,28	-1	0,1	0	0,11	374,39	374,63
1	0,28	-1	0,1	-1	0,07	409,59	409,09
0	0,23	1	0,3	1	0,15	391,85	391,77
0	0,23	1	0,3	0	0,11	417,04	417,04
0	0,23	1	0,3	-1	0,07	465,91	465,69
0	0,23	0	0,2	1	0,15	388,38	388,27
0	0,23	0	0,2	0	0,11	409,14	409,26
0	0,23	0	0,2	-1	0,07	453,26	453,22
0	0,23	-1	0,1	1	0,15	383,76	383,7
0	0,23	-1	0,1	0	0,11	398,5	398,33
0	0,23	-1	0,1	-1	0,07	430,34	430,82
-1	0,18	1	0,3	1	0,15	427,89	427,93
-1	0,18	1	0,3	0	0,11	447,12	446,77
-1	0,18	1	0,3	-1	0,07	490,2	490,43
-1	0,18	0	0,2	1	0,15	427,17	426,94
-1	0,18	0	0,2	0	0,11	442,5	442,29
-1	0,18	0	0,2	-1	0,07	480,55	480,82
-1	0,18	-1	0,1	1	0,15	425,62	425,59
-1	0,18	-1	0,1	0	0,11	436,54	436,04
-1	0,18	-1	0,1	-1	0,07	463,64	463,04

Таблица 2. Средна абсолютна процентна грешка между стойностите за максималната температура на горещото петно при симетрична и асиметрична форма на дефекта.

№	S(Tmax), °C	A(Tmax), °C	MAPE, %
---	-------------	-------------	---------

1	370,16	370,23	0,018911
2	398,96	398,91	0,012533
3	451,4	451,28	0,026584
4	364,63	364,27	0,09873
5	389,01	388,72	0,074548
6	435,87	435,58	0,066534
7	357,34	357,05	0,081155
8	374,39	374,63	0,064104
9	409,62	409,09	0,129388
10	391,79	391,77	0,005105
11	417,04	417,04	0
12	465,91	465,69	0,047219
13	388,33	388,27	0,015451
14	409,14	409,26	0,02933
15	453,26	453,22	0,008825
16	383,76	383,7	0,015635
17	398,5	398,33	0,04266
18	430,34	430,82	0,11154
19	427,89	427,93	0,009348
20	447,12	446,77	0,078279
21	490,2	490,43	0,04692
22	427,17	426,94	0,053843
23	442,5	442,29	0,047458
24	480,55	480,82	0,056186
25	425,56	425,54	0,0047
26	436,54	436,04	0,114537
27	463,64	463,04	0,129411
Средно	419,6526	419,543	0,052693

Тази стойност представлява вероятността да се отхвърли нулевата хипотеза, при условие че тя е вярна. Нивото на доверие α и P-стойността са свързани в следната зависимост: Ако $P \leq \alpha$ ($\alpha=0,05$ или $0,01$ или $0,001$), се приема, че нулевата хипотеза H_0 се отхвърля на ниво на значимост α . Получаването на стойности за $P > 0,05$, дават основание да бъде направен извод, че H_0 се приема. По този начин при съответните стойности на P се правят изводи:

- $P \leq 0,01$ – много силно доказателство срещу H_0
- $0,01 \leq P \leq 0,05$ – средно силно доказателство срещу H_0
- $0,05 \leq P$ – няма реално доказателство срещу H_0

Също така за проверка на хипотезата се използва разпределението на Фишер (F – разпределение). За проверка на нулевата хипотеза е направена проверка на хипотезата за равенство на две дисперсии (F-Test Two-Sample for Variances). Обобщение на резултатите за T_{\max} са представени в таблица 3.

При изчислена стойност $F=1,039$ за T_{\max} и $\Delta T_c = 1$, както и F за Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ е в границите $1 \div 1,02$, може да бъде направен извод, че за степените на свобода df и при приетото ниво на значимост ($\alpha=0,05$), определената критична стойност на F – отношението е $F_{\text{Critical one-tail}(1,91)} > F(1,039)$, съответно нулевата хипотеза H_0 за равенство на двете дисперсии се приема. Нулевата хипотеза H_0 за равенство на двете дисперсии се приема и при останалите параметъра на горещото петно

тъй като имат сходни резултати. За ΔT_c F Critical one-tail(1,929)>F(1,011), а при Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ -F Critical one-tail(1,92)>F(1,02).

При разглеждане на резултатите се установява, че определената Р-стойност за проверка на едностранна хипотеза е $P(F \leq f)$ one-tail=0,4598. Тази стойност е многократно по-висока от стойността на определеното ниво на значимост $\alpha=0,05$. Тъй като $P(F \leq f)$ one-tail(0,4598) > 0,05, следователно няма реално доказателство срещу нулевата хипотеза H_0 за равенство на двете дисперсии. Можем да положим същите съждения за ΔT_c – $P(F \leq f)$ one-tail(0,498) > 0,05, и Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ – $P(F \leq f)$ one-tail(0,47÷0,49) > 0,05

Таблица 3. Резултати от F-тест за проверка на хипотеза за равенство на дисперсиите при T_{\max}

Показател	A(T_{\max}), °C	S(T_{\max}), °C	
Mean	419,543	419,6526	Средна стойност за извадката
Variance	1288,829	1240,089	Дисперсия на извадката
Observations	27	28	Брой на наблюдения в извадката
df	26	27	Степени на свобода
F	1,039303		Изчислена стойност на F-отношението (F- получена от изследваните данни за проверка на нулевата хипотеза)
P(F<=f) one-tail	0,459878		Р-стойност за проверка на едностранна хипотеза
F Critical one-tail	1,912622		Критична стойност от таблицата с F-разпределението на Fisher за проверка на едностранна хипотеза

Въз основа на резултатите от таблица 3 е направена проверка на хипотеза за равенство на средните чрез провеждане на t-тест за независими извадки с равни дисперсии. Получените резултати са представени в таблица 4.

Таблица 4. Резултати от t-тест за независими извадки с равни дисперсии при T_{\max}

Показател	S(T_{\max}), °C	A(T_{\max}), °C	
Mean	419,6525926	419,542963	Извадкова средна стойност
Variance	1287,785012	1288,828583	Извадкова дисперсия
Observations	27	27	Брой на наблюдения в извадката
Pooled Variance	1288,306798		Обща дисперсия от двете извадки
Hypothesized Mean Difference	0		Хипотетична разлика (Разлика между средните – съгласно нулевата хипотеза)
df	52		Степени на свобода
t Stat	0,011222385		Емпирична стойност на t-статистика (T- получена от изследваните данни за проверка на нулевата хипотеза)
P(T<=t) one-tail	0,495544483		Р-стойност за проверка на едностранна хипотеза
t Critical one-tail	1,674689154		Критична стойност за T- разпределението на Стюdent при едностранна хипотеза
P(T<=t) two-tail	0,991088965		Р-стойност за проверка на двустранна хипотеза
t Critical two-tail	2,006646805		Критична стойност а T- разпределението на Стюdent при двустранна хипотеза

В резултат на статистическото обработване на резултатите от таблица 1 за T_{\max} е установено, че стойността на t Stat(0,011) < t Critical one-tai(1,67) при едностранна алтернатива. Резултатите за ΔT_c – t Stat(0,014) < t Critical one-tai(1,67), и Δh_{\max} , $\Delta T'_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ – t Stat(0,008÷0,013) < t Critical one-tai(1,67). Кое то ни дава основание за приемане на нулевата хипотеза H_0 , че асиметричността на дефекта не влияе върху

максималната стойност на температурата в горещото петно, както и върху другите параметри.

При двустранна алтернатива $t_{Stat}(0,011) < t_{Critical\ two-tai}(2,006)$, дава основание за приемане на нулевата хипотеза H_0 , че асиметричността на дефекта не влияе върху максималната стойност на температурата в горещото петно. При двустранна алтернатива за $\Delta T_c - t_{Stat}(0,014) < t_{Critical\ two-tai}(2,006)$, и при $\Delta h_{max}, \Delta T'_{max}, (\Delta T'/\Delta h)_{max} - t_{Stat} < t_{Critical\ two-tai}(2,006)$ също имаме основание за приемане на нулевата хипотеза H_0 , и че асиметричността на дефекта не влияе върху максималната стойност на температурния контраст както и на параметрите на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно.

За определяне на степента на съответствие (зависимостта) между резултатите за максималната температура на горещото петно за случаите на симетричен и асиметричен дефект е проведен корелационен анализ. Получените резултати са представени в таблица 5. От таблицата се вижда, че стойността на коефициентът на корелация е изключително висок $R=0,999975$, което показва, че съществува линейна връзка и може да се обобщи, че съответствието на резултатите е много силно. Линейна връзка съществува и между останалите параметри на повредата, съответно за ΔT_c коефициентът на корелация $R=0,99992$, и параметри на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно $\Delta h_{max}, \Delta T'_{max}, (\Delta T'/\Delta h)_{max}$ е в границите на $0,994 \div 0,9999$, което също доказва силната корелация между получените резултати.

Таблица 5. Корелационна матрица на резултатите за максималната стойност на горещото петно при симетричен и несиметричен дефект.

Показател	$S(T_{max}), ^\circ C$	$A(T_{max}), ^\circ C$
$S(T_{max}), ^\circ C$	1	
$A(T_{max}), ^\circ C$	0,999975	1

За изследване на линейната зависимост е използван методът на линейната регресия. Получените резултати от статистическото обработване на данните са представени в таблица 6.

Таблица 6. Резултати от статистическото изследване при използване на метода на линейната регресия.

Таблица 6.а

Regression Statistics	
Multiple R	0,999975
R Square	0,99995
Adjusted R Square	0,999948
Standard Error	0,259761
Observations	27

Таблица 6.б.

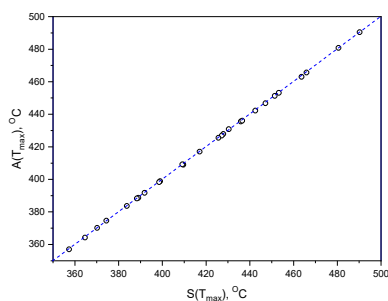
	df	SS	MS	F	Significance F
Regression	1	33508,46	33508,458	496598	2,97E-55
Residual	25	1,686901	0,0674760		
Total	26	33510,15			

Таблица 6.в.

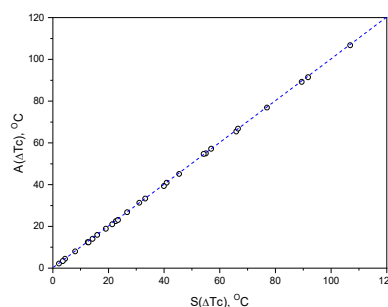
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-0,31339	0,597893	-0,52415149	0,60479	-1,54477	0,917997385
S(T _{max}), °C	1,000475	0,00142	704,6970934	2,97E-55	0,997551	1,003398914

От таблица 6 се вижда, че регресионната зависимост има коефициент на множествена корелация $R=0,99995$, а стойността на F –отношението за избраното ниво на значимост ($\alpha=0,005$) е многократно по-голяма от критичната $F(496598)>F_t(250)$. Изчислената стойност за Significance $F(2,97E-55) < \alpha(0,005)$. Това дава основание да бъде направено заключението, че регресионният модел е статистически значим. Регресионните зависимост при ΔT_c има коефициент на множествена корелация $R=0,99996$, а стойността на F - отношението за избраното ниво на значимост ($\alpha=0,005$) е многократно по-голяма от критичната $F(338471,5)>F_t(250)$. Изчислената стойност за Significance $F(3,58E-53) < \alpha(0,005)$.

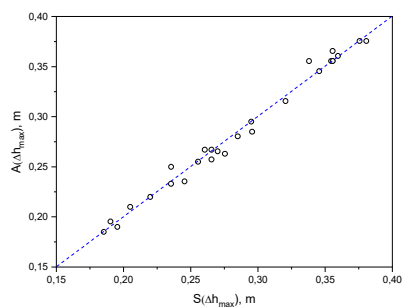
- При параметрите на производната на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно стойностите са съответно:
- Δh_{\max} има коефициент на множествена корелация $R=0,98$, а стойността на F -отношението за избраното ниво на значимост ($\alpha=0,005$) е многократно по-голяма от критичната $F(1927)>F_t(250)$. Изчислената стойност за Significance $F(3,48E-25) < \alpha(0,005)$
- $\Delta T'_{\max}$ има коефициент на множествена корелация $R=0,9999$, а стойността на F -отношението за избраното ниво на значимост ($\alpha=0,005$) е многократно по-голяма от критичната $F(305008)>F_t(250)$. Изчислената стойност за Significance $F(1,31E-52) < \alpha(0,005)$
- $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}$ има коефициент на множествена корелация $R=0,999$, а стойността на F - отношението за избраното ниво на значимост ($\alpha=0,005$) е многократно по-голяма от критичната $F(48751)>F_t(250)$. Изчислената стойност за Significance $F(1,18E-42) < \alpha(0,005)$, което също е основание да приемем, че регресионният модел е статистически значим.



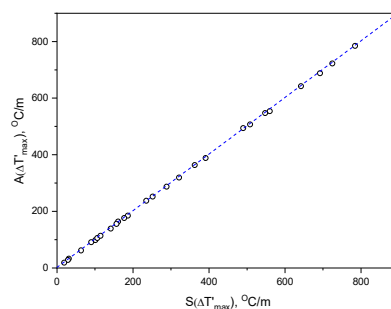
Фигура 2. Графично представяне на съответствието между стойностите за максималната температура на горещото петно при дефекти със симетрична и асиметрична форма.



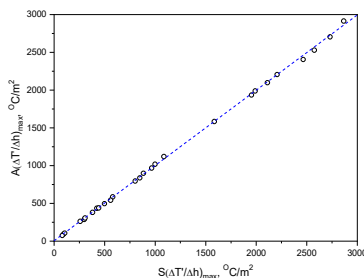
Фигура 3. Графично представяне на съответствието между стойностите за температурния контраст при дефекти със симетрична и асиметрична форма



Фигура 4. Графично представяне на съответствието между стойностите на Δh_{max} при дефекти със симетрична и асиметрична форма.



Фигура 5. Графично представяне на съответствието между стойностите на ΔT_{max} при дефекти със симетрична и асиметрична форма.



Фигура 6. Графично представяне на съответствието между стойностите на $(\Delta T/\Delta h)_{max}$ при дефекти със симетрична и асиметрична форма.

Графичното представяне на регресионните прави, отразяваща съответствието на резултатите за максималната стойност на температурата на горещото петно, температурния контраст както и параметрите на производната на температурния контраст при наличието на симетричен и асиметричен дефект са визуализирани на фигура 2÷6.

Обобщение

Получените резултати от корелационния анализ показват високо ниво на коефициента на корелация ($R > 0,99$), предполагащо наличието на линейна връзка и дава основание да бъде прието, че зависимостта между резултатите е много силна, а съответствието високо.

Установени са ниски стойности на средната абсолютна процентна грешка, което предполага високо съответствие между резултатите от двете извадки.

Проверката на хипотезата за равенство на дисперсиите на двете извадки и за равенство на средните показва, че за определеното ниво на значимост α изчислената стойност на F-отношението е по-ниска от критичната такава, което показва, че няма основание за отхвърляне на нулевата хипотеза H_0 за равенство на дисперсиите на двете извадки. Определената P-стойност за проверка на едностранна хипотеза е по-висока от

стойността на нивото на значимост, следователно няма реално доказателство срещу нулевата хипотеза H_0 за равенство на двете дисперсии.

Получените резултати от статистическото обработване на данните при проверка за равенство на средните е установено че емпиричната стойност на t-статистиката е по-ниска от критичната за едностранна и двустранна алтернативна хипотеза, което дава основание да бъде направено заключение за приемане на нулевата хипотеза, че асиметричността на формата на дефекта не влияе съществено върху параметрите на горещото петно.

Резултатите от регресионния анализ показват висока стойност на коефициентът на множествена корелация. Изчислените стойности на F-отношението и P-стойността за проверка на статистическата значимост на регресията потвърждават, че съществува линейна връзка и може да се обобщи, че съответствието между резултатите от изследванията за двете конфигурации на дефекта е много силна.

Това дава основание да се приеме, че между резултатите от двете изследвания има високо съответствие. Може да бъде направен изводът, че в изследвания диапазон на параметрите:

- асиметричността във формата на дефекта не оказва съществено влияние върху изследваните параметри на горещото петно на външната повърхност на стената на стоманоразливната кофа
- изведените зависимости за диагностика на симетричен дефект с форма на права триъгълна призма могат да бъдат прилагани и за асиметричен такъв.

Благодарности

Изследванията са проведени с финансовата подкрепа на Министерството на образованието и науката, Национална програма „Млади учени и постдокторанти 2021”.

Литература

1. Zabolotsky A., Modeling of the Temperature Field of the Casting Ladle Lining, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 84, No. 2, March, pp.342-347, 2011
2. Schmitt N., F. Hild, E. Blond, Thermal stresses in the working lining of a ladle during the steel refining process, Advances in refractories for the metallurgical industries IV, pp. 39-51, 2004.
3. Maldagne X.P.V., Theory and practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, John Wiley, NY, 2001.
4. Chakraborty B. and B. Sinha, Process-integrated steel ladle monitoring, based on infrared imaging – a robust approach to avoid ladle breakout, Quantitative Infrared Thermography Journal, <https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1639112>
5. Ladle Hot Spot Detection, Thermography-Based Ladle Monitoring System, InfraTec GmbH, www.InfraTec-infrared.com.
6. Maldagne X.P.V., Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, John Wiley, NY, 2001.
7. Иванка Петрова, Емил Михайлов, Изследване на температурното поле за диагностика на стоманоразливни кофи в металургията, Международно списание "Дни на безразрушителния контрол"(NDT Days), Том I Брой 3 Година 2018 ISSN: 2603-4018 (print), 2603-4646 (online) pp. 294-300
8. Yemelyanov V., T. Tochilkina, A. Nedelkin, E. Shved, Automation of monitoring and diagnosing the technical condition of torpedo ladle cars, MATEC Web of Conferences, 16-19 May 2018, Novosibirsk; Russian Federation, Volume 239, DOI: 10.1051/mateconf/201823904003.

9. Yemelyanov V., T. Tochilkina, E. Vasilieva, A. Nedelkin, E. Shved, Computer diagnostics of the torpedo ladle cars, 2018, AIP Conference Proceedings, 2034, art. no. 020008, DOI: 10.1063/1.5067351.
10. Chang L., E.L. Russell, R.D. Braatz, Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems, Springer, 2001.
11. Ahmed M., E. Olsson, P.Funk, N. Xiong, Efficient Condition Monitoring and Diagnosis Using a Case-Based Experience Sharing System, 20th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostics Engineering Management, p 305-314, COMADEM 2007, Faro, Portugal, June, 2007
12. Smith,R., T. Johansen, Multiple Model Approaches to Modelling and Control, Taylor and Francis: London, UK, 1997
13. Ivanka Petrova, Emil Mihailov, Determination of defects parameters in infrared diagnosis of steel ladle wall, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, Volume 55, Issue 6, Year 2020, ISSN 1314-7471 (print) ISSN 1314-7978 (on line) pp2158-2166
14. Ivanka Petrova, Emil Mihailov, Kosta Boshnakov, Decision support system for condition based maintenance of steel casting ladles, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, Volume 54 Issue 5 Year 2019 ISSN 1314-7471, pp.1103-1113