



Assessment of the Current Condition of the Steel Ladle's Wall

Ivanka S. PETROVA, Emil MIHAILOV

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

Abstract

A model-based approach for diagnosis of ladle lining damages on the base of thermovision images is proposed. For the calculations of the outer surface temperature for different depths and shapes of damages is used a Finite Elements Method of the heat transfer in the ladle lining. The approximation of simulation results is presented as regression equations. The parameters for the calculations with these diagnosis equations are the results of thermovision measurements. A system of diagnosis rules is developed.

Keywords: Diagnosis, Infrared Thermography, Metallurgical ladle, Heat transfer.

Оценка на текущото състояние на стената на стоманоразливна кофа

Иванка ПЕТРОВА, Емил МИХАЙЛОВ

1. Въведение

Термичните шокове, на които е подложена изолацията на периодично действащите металургични инсталации са честа причина за нейното разрушаване [1,2]. За безпроблемната работа на стоманоразливните кофи е необходимо познаването на остатъчната дебелина на изолацията, която в отделни проблемни участъци може да има по-ниски стойности, изразяващи се в локални износвания или разрушаване на отделни елементи от зидарията, при което съществува потенциална опасност от пробив и изтичане на метала. Тази остатъчна дебелина и локални износвания и разрушения могат да бъдат определени при провеждане на периодичен мониторинг на кофата в отделни моменти от нейната работа.

Ето защо диагностиката и предсказващото поддържане [3] на металургичните агрегати, работещи при високи температури са едни от най-важните задачи, които трябва да бъдат решавани в съвременните производствени условия. Те са от особено значение за устойчивата работа на агрегатите от технологичния процес. През последните години приложението на инфрачервената термография за получаване на пряка информация за повърхностната температура на металургичните агрегати [4] се превърна в основен подход при реализиране на диагностични процедури за оценка на състоянието [5,6].

За реализиране на процедурите по предсказващото поддържане на базата на реалното състояние на агрегатите в практиката на водещи производители се разработват компютърни информационно-диагностични системи, за наблюдение на процеса и събиране на данни за реалните нива на технологичните параметри и текущото състояние на отделните агрегати през целия им жизнен цикъл.[7-9]

С помощта на тези системи на базата на диагностични данни се извършва откриване на дефекти, установяване на размерите на дефектите и тяхната класификация и оценка на безопасността на инсталациите.

Процесът на оценка и надеждност на оборудването се състои от следните важни стъпки:

- обработване на данни от изследвания;
- установяване на дефекти;
- определяне на размера на дефекта;
- оценка на тежестта на дефекта;
- управление на ремонта.

Установяването на температурните полета и горещите повърхностни петна е само част от дейностите, свързани с мониторинга и подсигуряването на нормалната работа на оборудването. Оценката на получените резултати, тяхното класифициране и анализ са много важни за вземане на решения, как и особено кога да се приложи коригиращо действие.

Като основен подход при диагностициране на състоянието на огнеупорната изолация се прилага термографското измерване [10-15].

Управлението на ремонта класифицира тежестта на дефекта в три основни категории:

- допустима – повреда, която изисква мониторинг и прилагане на коригиращи действия в удобно време;
- умерена – повреда, която изисква прилагане на коригиращи действия възможно по-скоро;
- сериозна – много сериозна повреда, която изисква незабавно действие.

На сериозните дефекти се дава най-голям приоритет и се изисква незабавно действие в повечето случаи. Другите две степени на тежест изискват подходящ график за ремонт.

За реализиране на дейностите по предсказващо поддържане на база на текущото състояние се разработват и внедряват методики за комплексен подход при диагностициране и оценката на състоянието на оборудването, основаващи се на използване на резултатите от термографските измервания в комбинация с такива от математически модели (описващи топлообменните процеси и температурните полета в зависимост от дебелината на изолацията, вида на огнеупорните материални и условията, при които работят) и експертни знания.

Целта на настоящото изследване е да бъдат разработени правила за оценяване на състоянието на стоманоразливните кофи на базата на резултати от периодичен термографски мониторинг.

2. Изследване

За провеждане на изследването е разгледан реален технологичен процес на производство на стомана в свръхмощни електродъгови пещи – извънпешно обработване на метала – непрекъснато разливане на стоманени блокове, състоящ се от: разливане на стоманата от електродъговата пещ; транспортиране метала; обработване на метала на кофъчно-пешна инсталация; непрекъснато разливане на метала; поддръжка и ремонт; междинно нагриване.

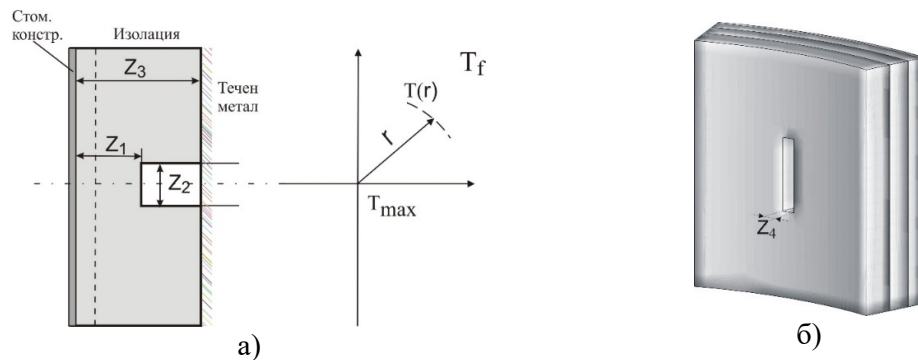
Причините за извеждане от експлоатация на стоманоразливната кофа и подлагането ѝ на капитален ремонт са общото износване на огнеупорната изолация и наличието на локални повреди, чието отстраняване е невъзможно с провеждане на горещ ремонт. Всяка от тези две причини е достатъчно основателна за спиране на кофата от експлоатация.



Фигура 1. Схема на работния цикъл на стоманодобивната кофа

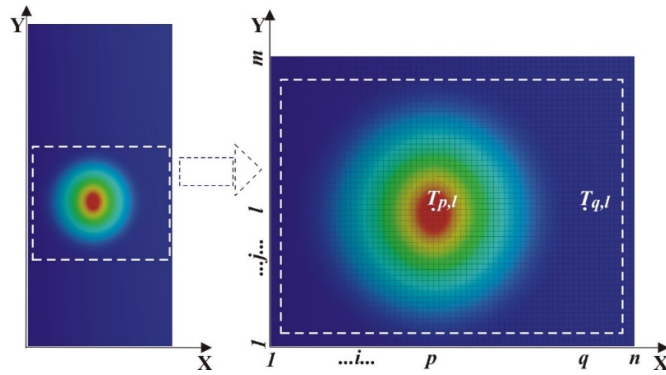
За провеждане на изследването е използван разработения 3D математически модел на нестационарния топлообмен в стената на стоманоразливна кофа [16], в която е симулиран дефект с формата на права триъгълна призма. Схематично представяне на конфигурацията на вертикален дефект между две огнеупорни тухли и приетите обозначения е визуализирано на фигура 2. За представяне на дефекта са приети следните означения на геометричните характеристики:

- остатъчната дебелина на стената Z_1 в областта на дефекта;
- височина на повредата Z_2 ;
- степен на износване на стената Z_3 в бездефектната област;
- широчина на повредата Z_4 .



Фиг. 2. Схематично представяне на дефекта и приетите означения

В резултат на математическото моделиране е определена повърхностната температура на стената на кофата, изменението на максималната температура на горещото петно T_{max} , на фоновата температура в неразрушения участък и температурния контраст ($\Delta T_k = T_{p,l} - T_{q,l}$) при преминаване през различните етапи от работния цикъл. Получените резултати са представени в фигура 3.



Фиг. 3. Разпределение на температурата по външната повърхност на кофата при наличие на симулирания дефект.

За провеждане на изследването е разработен план за провеждане на експеримента. За целите на изследването е прието широчината на фугата на вътрешната повърхност на стената в основата на дефекта да бъде постоянна и с максимално допустимия в практиката размер $Z_4 = 0,021\text{m}$, а останалите три параметъра да бъдат изменяни на три нива: минимално (-1), средно (0) и максимално (+1), при което е планиран и реализиран пълен факторен експеримент, изискващ провеждане на 27 броя експерименти.

Схемата на параметричното пространство е представена на фигура 4.

По този начин повредата е симулирана в началото на нейното появяване, когато остатъчната дебелина на стената пред нея е $Z_1(+1) = 0,15\text{m}$, при нейната максимална стойност (когато дебелината на стената пред нея има минимална допустима стойност) – $Z_1(-1) = 0,07\text{m}$, при достигането на която кофата трябва да бъде изведена от експлоатация и при средната стойност – $Z_1(0) = 0,11\text{m}$, при достигането на която по-нататъшното нарастване на дефекта навлиза в зоната на повишено внимание.

При стойности на параметъра $0,11\text{m} < Z_1 < 0,15\text{m}$ диагностичните процедури се провеждат при предварително зададена регулярна честота. Когато износването е в границите $0,07\text{m} < Z_1 < 0,11\text{m}$, интервалът на провеждане на измерванията е по-кратък и е обозначен като зона на внимание (AZ).

За тази схема на изграждане и химичен състав на огнеупорните материали от работния слой средностатистическата продължителност на експлоатационния цикъл на стоманоразливната кофа е 100 работни цикъла, т.е. участие в 100 бр. технологични цикъла.

Височината на дефекта оказва влияние върху температурното разпределение в горещото петно и неговата максимална стойност. Този параметър на повредата е симулиран в интервала $0,1\text{m} < Z_2 < 0,3\text{m}$. Средната стойност на износване е $Z_2(0) = 0,2\text{m}$. В проведените изследвания не са разгледани критични стойности на този размер.

Независимо от наличието на локални повреди, izolацията на стената, с начална дебелина $Z_3(+1) = 0,28\text{m}$, е подложена на износване в резултат на взаимодействието с течната стомана и шлаката.

Това износване е симулирано на три нива, като минималната допустима дебелина, след която кофата трябва да бъде изведена от експлоатация, е зададена $Z_3(-1) = 0,18\text{m}$. Средната стойност на износване е $Z_3(0) = 0,23\text{m}$. При стойности на параметъра $0,23\text{m} < Z_3 < 0,28\text{m}$ диагностичните процедури се провеждат при предварително зададена регулярна честота. Когато износването е в границите на зоната ($0,18\text{m} < Z_3 < 0,23\text{m}$) и стойността на остатъчната дебелина приближава критичната интервалът на провеждане на мониторинговите измервания е по-кратък.

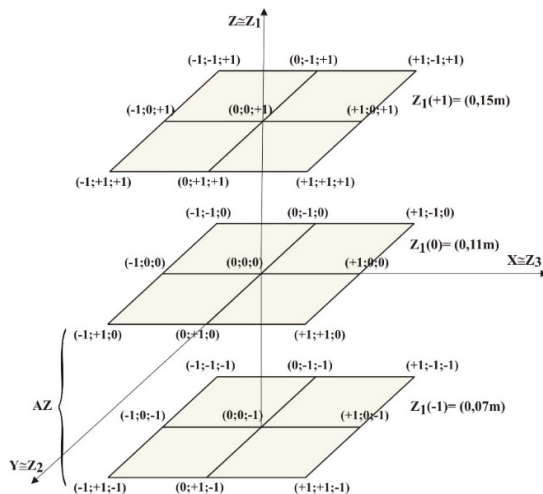
Граничните стойности на износването $Z_1(-1)=0,07\text{m}$ и $Z_3(-1)=0,18\text{m}$, при които кофата трябва да бъде извеждана от експлоатация са представени на фигура 5 с плътни линии. Когато в резултат на диагностичните процедури стойността на единият от параметрите достигне граничната стойност, стоманоразливната кофа трябва да бъде отстранявана, независимо от стойността на другия.

Категоризирането на повредата в зависимост от стойността на остатъчната дебелина на стената Z_3 и тази пред дефекта Z_1 са представени в таблица 1.

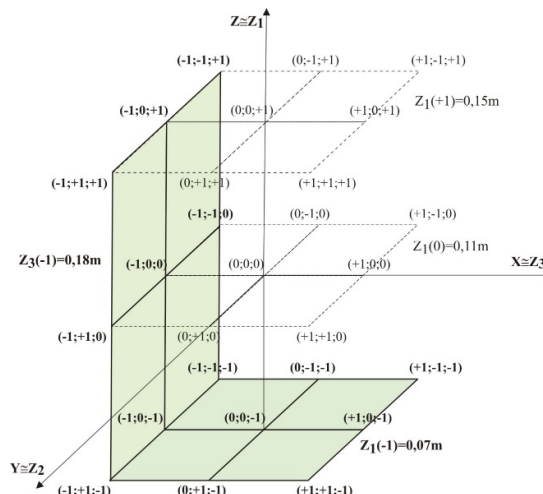
Таблица 1. Категоризиране на повредата в зависимост от стойностите на параметрите Z_3 и Z_1 .

Z_3	Z_1	$0,11\text{m} < Z_1 \leq 0,15\text{m}$	$0,07\text{m} < Z_1 \leq 0,11\text{m}$	$Z_1 \leq 0,07\text{m}$
$0,23\text{m} < Z_3 \leq 0,28\text{m}$		ДОПУСТИМА	УМЕРЕНА	СЕРИОЗНА
$0,18\text{m} < Z_3 \leq 0,23\text{m}$		УМЕРЕНА	УМЕРЕНА	СЕРИОЗНА
$Z_3 \leq 0,18\text{m}$		СЕРИОЗНА	СЕРИОЗНА	СЕРИОЗНА

За дефиниране на диагностични признаци (белези) е проведен корелационен анализ на резултатите за повърхностното температурно поле на стената на стоманоразливната кофа в определен като подходящ момент за термографски мониторинг. Установени са максималната температура на горещото петно и съответстващата ѝ фонов температура. Определени са стойностите на производната на температурния контраст по височина на горещото петно. В резултат на анализа [16] са установени високи стойности на корелационните коефициенти между параметрите на дефекта и параметрите на повърхностното температурно поле и горещото петно, поради което те могат да бъдат разглеждани като диагностични белези.



Фиг. 4. План за провеждане на експеримента и нива на параметъра Z_1 .



Фиг. 5. План за провеждане на експеримента и критични нива на Z_1 и Z_3 .

Получените симулационни резултати за повърхностната температура са подложени на регресионен анализ по метода на най-малките квадрати [17] и са установени апроксимиращи зависимости за оценяване на общото износване и повредата на стената на стоманоразливната кофа:

- Остатъчната дебелината на стената на кофата Z_3 и фоновата температура в бездефектната област;

$$Z_3 = f(T_f) \quad (1)$$

- Остатъчната дебелина на стената пред дефекта Z_1 и максималната температура на горещото петно T_{max} ;

$$Z_1 = f(T_{max}, Z_2, Z_3) \quad (2)$$

- Височината на дефекта Z_2 и разстоянието $\Delta h_{max} = h_2 - h_1$ между проекциите на локалния максимум T'_{max} и локалния минимум T'_{min} на производната на температурния контраст по височина на горещото петно (вертикалната ос на горещото петно);

$$Z_2 = f(\Delta h_{max}, Z_1, Z_3) \quad (3)$$

- Остатъчната дебелина на стената Z_1 пред дефекта и разликата $\Delta T'_{max} = T'_{max} - T'_{min}$ от стойностите на локалния максимум и локалния минимум на производната на температурния контраст по височина на горещото петно;

$$Z_1 = f(\Delta T'_{max}, Z_2, Z_3) \quad (4)$$

- Остатъчната дебелина на стената пред дефекта Z_1 и отношението $\Delta T'_{max} / \Delta h_{max} = (\Delta T' / \Delta h)_{max}$ между разликата от стойностите на локалния максимум и локалния минимум на производната на температурния контраст и разстоянието между техните проекции по височина на горещото петно.

$$Z_1 = f(\Delta T'_{max} / \Delta h_{max}, Z_2, Z_3) \quad (5)$$

Също така са изведени и регресионни зависимости между максималната стойност на горещото петно при стойностите за избраните нива на изследване на остатъчната дебелина на стената пред дефекта Z_1 и стойностите на височината на повредата Z_2 и остатъчната дебелина на стената Z_3 в неповредения участък.

$$T_{max} = f(Z_2, Z_3) \quad (6)$$

След преминаване на стоманоразливната кофа през етапите на технологичния процес и след приключване на непрекъснатото разливане на стоманата, празната кофа постъпва в участък за провеждане на дейности по нейната поддръжка включващи визуална инспекция на състоянието на вътрешната повърхност на топлинната изолация, на външната повърхност на стоманената конструкция и на стената като цяло и замяна на износени фасонни огнеупорни устройства.

В тези условия, с помощта на визуалната камера на инфрачервения прибор или при приложение на дигитална камера с висока разделителна способност и при отчитане на параметрите на оптичната система, може да бъдат определени геометричните размери на локалните повреди на нивото на вътрешната повърхност на кофата.

Това позволява прилагане на комплексен подход, включващ комбиниране на резултати от визуална оценка, термографско измерване на повърхностното температурно поле и тези от математическото моделиране на нестационарното топлинното и температурно състояние на стената на стоманоразливната кофа по време отделните работни цикли и на различен етап от нейната експлоатация при различна степен на износване и локални повреди.

При използване на изведената регресионна зависимост (1) за определяне на средната дебелина на изолацията Z_3 на базата на измерената температурата на външната повърхност в бездефектната област T_f^* може да бъде извършвана оценка на общото износване на стената. През първата половина от експлоатационната кампания термографския мониторинг може да бъде в резултат на регулярни измервания. В периода на оглед и поддръжка на стоманоразливната кофа при установяване на локална повреда трябва да бъде насрочен мониторинг за оценяване на размерите на дефекта и тежестта на повредата. В зависимост от резултатите по оценка на локалната повреда термографските измервания може да продължат като регулярни или да бъде намален периодът между диагностичните процедури. При навлизане на износването в зоната $(0,18m < Z_3 < 0,23m)$ диагностичните процедури се провеждат през по-малки интервали от

време в зависимост от конкретните резултати с цел оценяване на повредата и предсказване на остатъчния живот на съоръжението. Независимо от броя на реализираните работни цикли, при регистриране на остатъчна дебелина в интервала $0,18\text{m} < Z_3 \leq 0,185\text{m}$, мониторингът трябва да бъде извършван на всеки следващ работен цикъл с цел оценяване на реалното състояние и вземане на решение за спиране на кофата от експлоатация при достигане на критични стойности на остатъчната дебелината стената $Z_3 \leq 0,18\text{m}$. Достигането на критичната стойност е основание за извежда от експлоатация независимо от наличието на локален дефект и оценката на неговата тежест (при стойността на $Z_1 > 0,18\text{m}$), защото въз основа на стойността на Z_3 повредата се категоризира като сериозна.

След определяне на стойността на Z_3 по уравнение (1) и установена от визуалната инспекция стойност на височината на дефекта Z_2 стойността на дебелината на изолацията пред дефекта Z_1 може да бъде определена по уравнение (2) при замяна на T_{\max} с максималната температура T_{\max}^* на горещото петно, измерена при термографски мониторинг.

Комбинацията от уравнения (3), (4) и (3), (5) представляват две системи от две уравнения с две неизвестни, в които стойността на Z_3 се определя еднозначно по уравнение (1) и те могат да бъдат използвани за определяне на стойностите на Z_1 и Z_2 на базата на параметрите на температурния контраст по вертикалната ос на горещото петно, изчислени от измереното с термографската камера температурно поле на повърхността. Определяните стойности на Z_2 могат да бъдат използвани и за определяне на стойността на Z_1 по уравнение (2).

При оценяване се разглеждат три степени на тежестта на повредата Z_1 , в зависимост от които се прилага и съответната честота на измерване с цел инфрачервена диагностика. Когато стойността е извън зоната на внимание и повредата се категоризира като допустима се провеждат регулярни измервания, като в зависимост от конкретната стойност на Z_1 се определя и интервалът на мониторинг. При навлизане в зоната на внимание, когато повредата се категоризира като умерена и с приближаване на критичната стойност ($Z_1 = 0,07\text{m}$), и остатъчната дебелина и на общото износване $0,185\text{m} < Z_3$ диагностичните измервания се провеждат през по-кратки интервали и когато износването е близко до критичното ($0,07\text{m} < Z_1 \leq 0,075\text{m}$) измерванията се провеждат на всеки следващ цикъл до спиране на кофата за ремонт при достигане на $Z_1 \leq 0,07\text{m}$, когато повредата се категоризира като сериозна (която изисква незабавно действие) и кофата трябва да бъде изведена от експлоатация.

Използването на термограмите от периодичния мониторинг в процеса на инфрачервена диагностика позволява детайлно определяне на температурните полета в областта на дефекта и фоновата температура, което е предпоставка за прецизното измерване на стойностите във всяка точка от температурното поле, а от там и необходимите температури за определяне на стойностите на диагностичните признаци, с помощта на които да бъдат определяни размерите на дефекта и извършвана оценка на тежестта му.

Уравнение (6), позволява определянето на теоретичната максимална температура, която би се получила в горещото петно в областта на дефекта при максималната допустима дълбочина на дефекта $Z_1 = 0,07\text{m}$ в зависимост от стойностите на Z_2 и Z_3 . Това позволява при регистриране на максималната измерена с инфрачервената камера повърхностна температура на горещото петно T_{\max}^* да бъде съпоставяна с определена теоретична $T_m(0,07)$ и при съответните стойности на Z_2 и Z_3 и да бъде извършвана проверка по метода на граничните стойности. Такива зависимости са изведени и за останалите нива на параметъра Z_1 . С помощта на измерената максималната температура на горещото петно T_{\max}^* и уравнение (6) може да се определи дали стойността на Z_1 е в

интервала на регулярните измервания с очаквана допустима тежест на дефекта или в интервалът на повишено внимание, когато повредата се категоризира като умерена и постепенно се доближава към критичната стойност на размера, при който да бъде оценена като тежка. При стойности на $T_{\max}^* \geq T_m(0,07)$ може да бъде прието, че стойността на $Z_1 \leq 0,07m$ и повредата се категоризира като тежка.

3. Резултати

При използване на резултати от визуалните инспекции и заместване в уравнения (1) – (6) със съответните стойности, определени в резултат на термовизионни измервания на повърхностното температурно поле в момента на позициониране на кофата на стенда на МНРС ($T_{\max}^* \Rightarrow T_{\max}$, $\Delta h_{\max}^* \Rightarrow \Delta h_{\max}$, $\Delta T_{\max}^* \Rightarrow \Delta T_{\max}$, $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}^* \Rightarrow (\Delta T'/\Delta h)_{\max}$) могат да бъдат определени реалните стойности на параметрите Z_1 , Z_2 и Z_3 .

По този начин описаните процедури позволяват определяне на:

- остатъчната дебелина на стената Z_3 в бездефектната област по измерената повърхностна температура T^* ;
- височината на дефекта Z_2 при използване на:
 - ✓ резултатите от визуалните инспекции и
 - ✓ резултатите от термовизионния мониторинг при определяне на разстоянието Δh_{\max}^* между проекциите на локалния максимум и локалния минимум на производната на температурния контраст по височина на горещото петно (вертикалната ос на горещото петно);
- стойността на дебелината на изолацията пред дефекта Z_1 въз основа на:
 - ✓ измерената максимална температура на горещото петно T_{\max}^* и
 - ✓ разликата $\Delta T_{\max}^* = T_{\max}^* - T_{\min}^*$ от стойностите на локалния максимум и локалния минимум на производната на температурния контраст по височина на горещото петно или отношението $(\Delta T'/\Delta h)_{\max}^*$ на тази разлика и разстоянието между техните проекции;
- тежестта на повредата на базата на измерената максимална температура на горещото петно T_{\max}^* .

Така чрез приложение на резултатите от термографските измервания съвместно с тези от визуалната инспекция в изведените апроксимиращи зависимости от математическото моделиране на нестационарния топлообмен в стената на стоманоразливната кофа може да бъдат определяни размерите на износването и разглеждания дефект, на базата на които да бъде направена оценка на тежестта на повредата и да бъде взето решение за по-нататъшна експлоатация.

Това позволява да бъде обобщено, че описаният моделно базиран диагностичен подход, включващ комплексното използване на математическото моделиране на топлинното и температурно състояние на огнеупорната изолация и статистическа обработка на получените резултати за извеждане на апроксимиращи функции за параметрите на повредата, в комбинация с резултати от термовизионно измерване на повърхностната температура и такива от визуална инспекция е напълно приложим за онлайн диагностика.

Прилагането на подобни функции е свързано с отчитане на температурните полета, и извеждане на градиентни стойности, което налага използване на специално разработени процедури, алгоритми за оценка, анализиращи получените резултати.

Резултатите от симулацията, експлоатационните правила и експертния опит позволяват да се дефинира система от правила (представени в таблица 2) за класифициране на повредата в някои от следните класове:

- клас А -- Кофата е изправна, налично е износване, но липсва локална повреда ($Z_1=Z_3$) и се налагат регулярни измервания за оценка на износването в резултат на контакта с течната стомана;
- клас В -- Налични са износване и/или локален дефект с нисък риск от авария, експлоатацията може да продължи при регулярни термографски инспекции;
- клас С -- Налични са износване и/или повреда с нарастващ риск от авария, експлоатацията може да продължи при по-чести термографски инспекции;
- клас D -- Има риск от авария и следва да се провеждат измервания на всеки следващ цикъл до спиране при достигане на критична стойност;
- клас Е -- Има изключително голям риск от авария и кофата следва да се изпрати за ремонт.

Тъй като $Z_1 \leq Z_3$, равенството е възможно само при липса на локална повреда на изолацията.

Таблица 2. Система от правила за класифициране на повредата.

R№	Z_3		Z_1		Клас
R1	: Ако $0,23m < Z_3 \leq 0,28m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	А
R2	: Ако $0,23m < Z_3 \leq 0,28m$	и	$0,11m < Z_1 \leq 0,15m$	то	В
R3	: Ако $0,23m < Z_3 \leq 0,28m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,11m$	то	С
R4	: Ако $0,23m < Z_3 \leq 0,28m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,075m$	то	D
R5	: Ако $0,185m < Z_3 \leq 0,23m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	С
R6	: Ако $0,185m < Z_3 \leq 0,23m$	и	$0,11m < Z_1 \leq 0,15m$	то	В
R7	: Ако $0,185m < Z_3 \leq 0,23m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,11m$	то	С
R8	: Ако $0,185m < Z_3 \leq 0,23m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,075m$	то	D
R9	: Ако $0,185m < Z_3 \leq 0,185m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	D
R10	: Ако $0,18m < Z_3 \leq 0,185m$	и	$0,11m < Z_1 \leq 0,15m$	то	D
R11	: Ако $0,18m < Z_3 \leq 0,185m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,11m$	то	D
R12	: Ако $0,18m < Z_3 \leq 0,185m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,075m$	то	D
R13	: Ако $0,18m < Z_3 \leq 0,28m$	и	$Z_1 \leq 0,07m$	то	Е
R14	: Ако $Z_3 \leq 0,18m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	Е
R15	: Ако $Z_3 \leq 0,18m$	и	$0,07m < Z_1 \leq 0,15m$	то	Е
R16	: Ако $Z_3 \leq 0,18m$	или	$Z_1 \leq 0,07m$	то	Е

Описаните процедури и формулираната система от диагностични правила представляват комплексен подход за провеждане на диагностични процедури, основаваща се на комбинирано използване на резултатите от измерване на термографско измерване на повърхностната температура, визуална оценка и приложение на апроксимиращи зависимости (изведени при моделиране на нестационарното топлинно и температурно състояние на огнеупорната изолация), включващи оценяване на състоянието на изолацията на стоманоразливната кофа, класифициране на повредите и вземане на решение за по-нататъшната експлоатация, поддръжка или ремонт.

Описаната система от правила, заедно с изведените апроксимиращи функции, позволява да бъде разработен алгоритъм за реализиране на система за подпомагане

вземането на решения (Decision Support System) за експлоатация и поддръжка на стоманоразливните кофи с цел безопасно използване на техния максимален ресурс.

4. Обобщение

На базата на получени симулационни резултати от пълен факторен експеримент и изведени апроксимиращи зависимости, описващи връзката между стойностите на параметрите на повредата и формулираните диагностични белези, е разработена диагностична процедура, основаваща се на комбинирано използване на резултатите от измерване на температурата на повърхността с IR камера, визуална оценка, моделиране на нестационарното топлинно и температурно състояние на огнеупорната изолация.

На базата на резултатите от симулацията, експлоатационните правила и експертния опит са дефинирани система от правила за класифициране на повредата и необходимите дейности за следене и оценяване на реалното състоянието и вземане на решение за поддръжка и експлоатация на стоманоразливната кофа.

Разработените са правила позволяват на базата на измереното с помощта на термографска камера повърхностно температурно поле да бъде оценявано реалното състояние на стоманоразливната кофа и вземане на обосновано решение за извеждането ѝ от експлоатация.

Описаните правила са основа за изграждане на алгоритъм, с помощта на който да бъде реализирана система за подпомагане вземането на решения (Decision Support System) за експлоатация и поддръжка на стоманоразливните кофи с цел безопасно използване на техния максимален ресурс.

Благодарности

Авторите изказват благодарност на НИС-ХТМУ (дог. 12045/14.04.2020).

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. 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
4. Maldagne X.P.V., Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, John Wiley, NY, 2001.
5. Ding S., Model-Based Fault Diagnosis Techniques, Springer, 2008.
6. Fidali M., An Idea of Continuous Thermographic Monitoring of Machinery, Proc. of the 9th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography, Krakov, Poland, 2008.
7. Lamm R., S. Kirchhoff, Optimization of ladle refractory lining, gap and crack detection, lining surface temperature and sand-filling of the ladle-taphole by means of a 3d-laserprofile-measurement system that is immersed into a hot ladle to evaluate the entire condition, http://www.unitecr2017.mundodecongresos.com/abstracts/Paper_rbofbhfxcsxhpgipoispm.pdf
8. Omori J., Blast furnace Phenomena and Modeling, Elsevier, London, 1987, pp. 631.
9. Yemelyanov V., N.Y. Yemelyanova, O.A. Morozova, A.A. Nedelkin, Specialized computer system to diagnose critical lined equipment, International Conference Information Technologies in Business and Industry 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1015, 2018, 052032 DOI: 10.1088/1742-6596/1015/5/052032.

10. 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/ matecconf/201823904003.
11. 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.
12. Chang L., E.L. Russell, R.D. Braatz, Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems, Springer, 2001.
13. Maldagne X.P.V., Theory and practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, John Wiley, NY, 2001.
14. 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>]
15. Ladle Hot Spot Detection, Thermography-Based Ladle Monitoring System, InfraTec GmbH, www.InfraTec-infrared.com.
16. Perova I., E. Mihailov, K. Boshnakov, Decision support system for condition based maintenance of steel casting ladles, Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 54(5), 2019, pp. 1103-1113.
17. Вучков И., Экспериментални изследвания и идентификация, Техника, София, 1990.