
ПОВИШАВАНЕ НА РЕСУРСНАТА ЕФЕКТИВНОСТ ЧРЕЗ ПРЕДСКАЗВАЩО ПОДДЪРЖАНЕ НА МЕТАЛУРГИЧНИ АГРЕГАТИ

проф. д-р Емил Михайлов, Иванка Петрова, Моника Асенова

Химикотехнологичен и металургичен университет

Резюме. Представена е процедура за оценяване на реалното състояние на стоманоразливни кофи на базата на резултати от периодичен мониторинг като част от система за вземане на решения при предсказващо поддържане с цел безопасно използване на техния максимален ресурс.

JEL: L6; L60; L61

УВОД

В процеса на експлоатация, огнеупорната изолация на високотемпературните агрегати е подложена на влиянието на термичните шокове от последователните топосмени и химическото и физическо въздействие на течния метал, довеждащи до нейното износване или разрушаване. Всичко това заедно с непрекъснатия характер на металургичните технологии и интензифицирането на производството увеличават риска от повреда и нарушаване на структурната цялост на агрегатите по време на технологичния процес.

Разрушаването на структурната цялост на огнеупорната изолация на това оборудване довежда до принудителното прекъсване на производството и значителни разходи за спешна реакция и налагат да бъдат предприемани мерки за намаляване на риска от подобни ситуации.

За разрешаване на тези проблеми в производствените процеси в металургичната промишленост се въвеждат устойчиви системи за взимане на обосновани решения и предсказващо поддържане на оборудването, основаващи се на мониторинг и диагностика на състоянието на огнеупорната изолация на високотемпературните пещи и спомагателното оборудване (Chang et al. 2001).

Поддържането на технологичните съоръжения и агрегати, основаващо се на оценка на текущото им състояние в съчетание със съответните коригиращи действия осигурява безаварийна експлоатация, удължава живота им, намалява престоите, поддържа оптималното ниво на производството и точните срокове на доставката на продукция, и др. (Iserman et al. 2006; Yemelyanov et al. 2018). Това позволява ефективен мениджмънт на поддръжката на съоръженията и намалени разходи на материали за текущи и основни ремонти според действителното състояние на машините и агрегатите.

В резултат на предсказващо поддържане, основаващо се на периодична инспекция и диагностика на състоянието на огнеупорната изолация за избягване на необосновано извеждане от експлоатация, удължаването на експлоатационния живот на металургични агрегати води до годишно спестяване в рамките на едно производство, възлизащо на приблизително 380000 EUR (Viertauer et al. 2018). Подобен подход към работата на пещи за производство на стъкло води до икономия от 280000 EUR годишно.

За реализиране на процедурите по поддръжка на базата на реалното състояние на агрегатите и предсказващото поддържане в практиката на водещи производители се разработват компютърни информационно-диагностични системи за наблюдение на процеса и събиране и класифициране на данни за реалните нива на технологичните параметри с цел оценяване на текущото състояние на отделните агрегати през целия им жизнен цикъл (Severson et al. 2015; Yan and Xue 2007; Chernyi et al. 2022).

Сложността на технологичните операции, условията при които протичат, размерът на индустриалното оборудване и обемът на данните, които се генерират от периодичните измервания в комбинация с тези от работните параметри на процеса правят субективната оценка изключително затруднена и налага да бъдат разработвани специфични подходи и правила за провеждане на мониторинг и оценка и интерпретация на данните от инспекциите. Всичко това се обединява в работата на съвременните системи за диагностика и вземане на обосновани решения, базирани на обработване на резултатите от различни подходи на мониторинг.

В настоящата работа са представени резултатите от развитие на система за диагностика, оценяване и вземане на решения за експлоатация и като част от процедури по предсказващо поддържане с цел удължаване на жизнения цикъл и използване на максималния ресурс на стоманоразливни кофи.

ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследването е технологичен процес на производство на непрекъснато лети стоманени блокове (Фиг. 1) включващ добиване на стоманата, наливането ѝ в стоманоразливна кофа, извънпещното обработване, непрекъснато разливане. При осъществяването на това производство, стоманоразливната кофа последователно и многократно преминава през отделните позиции на технологичния процес, а огнеупорната ѝ изолация е подложена на циклично топлинно натоварване в резултат на контакта с течната стомана и предвидените последващи дейности по поддържане и подготовка за работа.



Фигура 1. Схема на работния цикъл на стоманодобивната кофа

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

В практиката се прилагат три типа техническо поддръжане:

- а) Реактивно поддръжане – при което има непосредствено реагиране на появила се неизправност чрез спиране на съоръжението, ремонт (замяна) без провеждане на диагностични процедури.
- б) Превантивно поддръжане – при което когато установената от диагностичната система деградация под зададено допустимо ниво, се предприемат изпреварващи мерки за инспекция, профилактика, ремонт или замяна.
- в) Предсказващо поддръжане – при което се детектират ранни форми на деградиране и се предприемат съответни мерки.

В съвременното управление на технологичните процеси е прието, че поддръжането и операционните въздействия трябва да се разглеждат като два взаимно свързани комплекса от действия при установено от диагностиката състояние на обекта. Управлението на базата на оценка на състоянието е много по-ефективно икономически от това по график.

Оценяването на реалното състояние на стената за предсказващо поддръжане налага разработване на методика за прилагането на

- резултатите от различните възможни подходи за получаване и анализ на необходимата информация и
- процедури за оценяване и класифициране повредите и на реалното състояние на огнеупорната изолация и комбинирането им за вземане на обосновано решение за експлоатация на стоманоразливната кофа като част от система за предсказващо поддръжане.

За изследване на процеса на производството на непрекъснатото лети блокове и установяване на стойностите на работните и технологични параметри е проведено изследване на реален технологичен процес

На базата на отчетените стойности са определени чистите времена на отделните операции. Отчетените стойности за отделните параметри са подложени на статистическо обработване. За постигане на целите на конкретното изследване вниманието е съсредоточено върху температурния режим на метала до постъпването му в междинната кофа на машината за непрекъснато разливане и времеви график, в който са включени и времената за поддържане и междинно подгриване на огнеупорната изолация на кофата. Разработения времеви график, осигуряващ ритмична работа на стоманоразливната кофа е представен на Фигура 2.

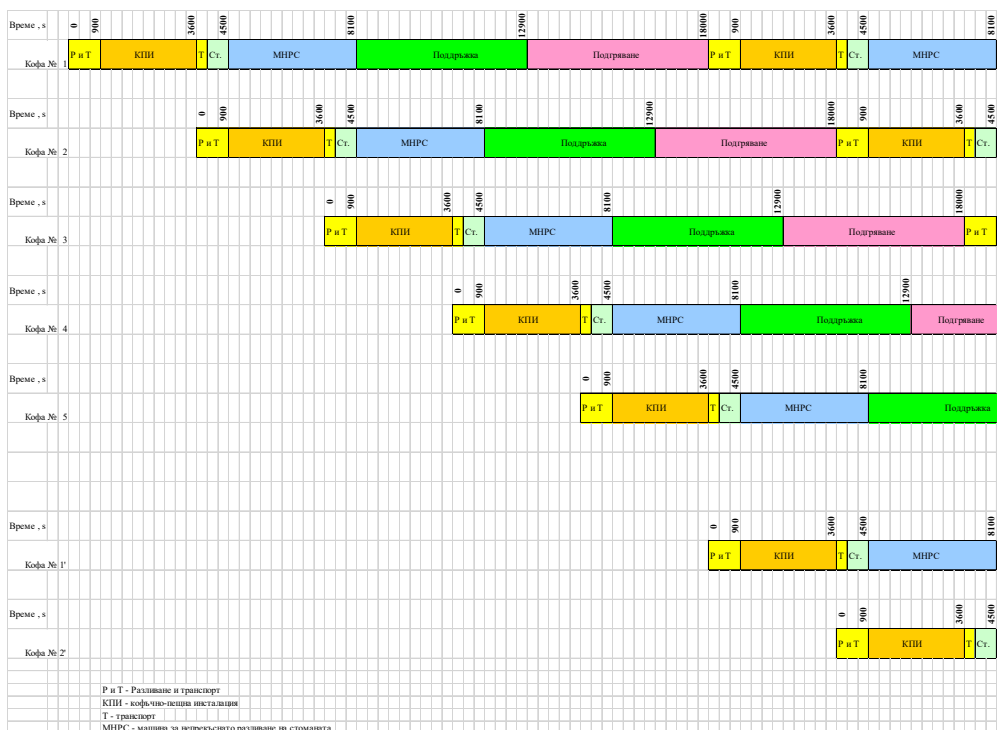
Времевият график е използван за актуализиране на температурния режим на течния метал в процеса неговото транспортиране, обработване и разливане (Фиг. 3).

За реализирането на изследването при отчитане на влиянието на общото износване на стената и локалните повреди върху повърхностното температурно поле и параметрите на формиращите се горещи петна е разработен и числено реализиран 3D математичен модел на стената на стоманоразливната кофа.

При отчитане динамична картина на топлообменните процеси в разработения 3D математичния модел на стената на стоманоразливната кофа е симулиран дефект с формата на права триъгълна призма, наподобяващ дефект в резултат на нарастваща пукнатина или разширяваща се фуга между тухлите на огнеупорната зидария на кофата (Petrova et al. 2019; Petrova and Mihailov 2020; Petrova and Mihailov 2018). Схематично представяне на конфигурация на вертикален дефект с приетите обозначения и формиращото се в резултат на повредата горещо повърхностно температурно петно са визуализирани на Фигура 4.

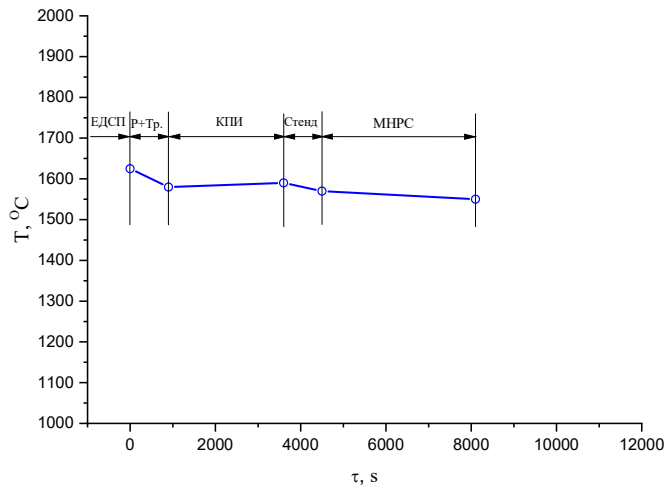
За представяне на дефекта са приети следните означения на геометричните характеристики:

- 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 .

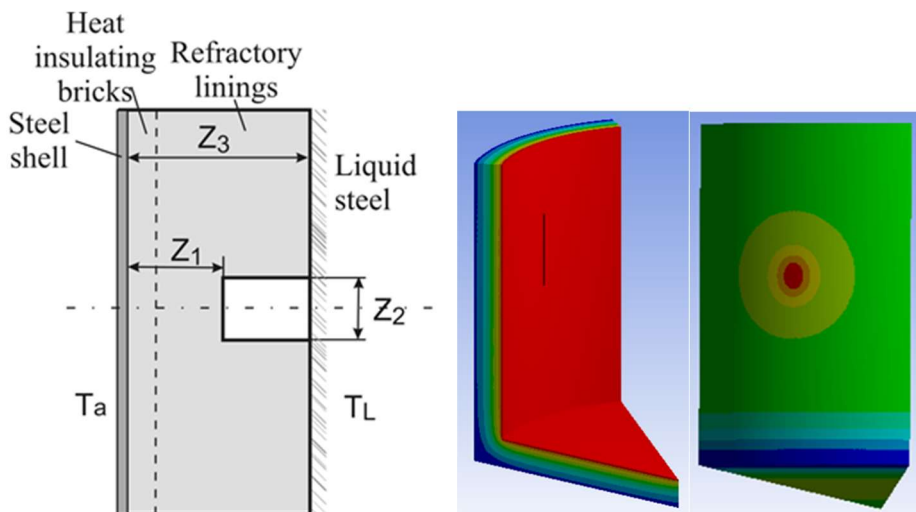


Фигура 2. Времеви график на работния цикъл на стоманоразливните кофи.

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 $Z_4 = \text{const}$, 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.



Фигура 3. Температурен режим на течния метал по време на технологичния процес.



Фигура 4. Схема на повредата параметрите и геометричните параметри.

В резултат на проведените симулационни изследвания, обработване и анализ на резултатите са определени оптималния времеви интервал за провеждане на мониторинг, диагностичните параметри за провеждане на термографски мониторинг и са изведени на апроксимиращи зависимости за определяне на параметрите на повредата (Petrova et al. 2019; Petrova and Mihailov 2018).

При използване на резултатите от термографските измервания за оценяване на реалното състояние на стената на стоманоразливната кофа могат

да бъдат използвани изведените апроксимиращи зависимости (Petrova and Mihailov 2020), чийто общ вид може да бъде представен със уравнения (1)-(6):

$$Z_3 = f(T_f^*), \quad (1)$$

$$Z_2 = f(\Delta h_{\max}^*, Z_1, Z_3), \quad (2)$$

$$Z_1 = f(T_{\max}^*, Z_2, Z_3), \quad (3)$$

$$Z_1 = f(\Delta T_{\max}^*, Z_2, Z_3), \quad (4)$$

$$Z_1 = f((\Delta T_{\max}^* / \Delta h)_{\max}^*, Z_2, Z_3), \quad (5)$$

$$T_{\max}(Z_1) = f(Z_2, Z_3), \quad (6)$$

където:

$T_{\max}$ е теоретичната максимална температура на горещото петно;

$T_{\max}^*$ – максималната измерена температура на горещото петно от термографски мониторинг;

T_f^* повърхностна температура в бездефектната област от термографски мониторинг;

$\Delta h_{\max}^*$, $\Delta T_{\max}^*$, $(\Delta T_{\max}^* / \Delta h)_{\max}^*$ – диагностични параметри на горещото петно.

Апроксимиращата зависимост (1) позволява определяне на общото износване на стената на кофата Z_3 на базата на измерената фоновата температура в бездефектната област. Чрез зависимост (2) се определя височината на дефекта Z_2 . Остатъчната дебелина на стената пред дефекта Z_1 се определя по зависимости (3) - (5).

След преминаване на стоманоразливната кофа през етапите на технологичния процес и след приключване на непрекъснатото разливане на стоманата, празната кофа постъпва в участък, визуална инспекция на състоянието на вътрешната повърхност на огнеупорната изолация, на външната повърхност на стоманената конструкция и на стената като цяло.

В периодите на провеждане на дейности по поддръжка, включващи замяна на износени фасонни огнеупорни устройства, височината на дефекта Z_2 може да бъде определяна в резултат от визуална оценка или чрез лазерно сканиране на вътрешната повърхност.

Това позволява прилагане на комплексен подход на оценка, включващ комбиниране на резултати от визуална оценка, термографско измерване на повърхностното температурно поле и тези от математично 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.

За прилагането на този комплексен подход са разработени следните процедури за оценка на повредата, поддържане и планиране на термографския мониторинг с цел максимално оползотворяване на наличния ресурс и вземане на обосновано решение за отстраняване на стоманоразливната кофа за ремонт:

- I. Процедура за оценяване на общото износване на стената по зависимост (1) на базата на измерената температура в бездефектната област.
- II. Процедура за оценяване на локалната повреда, включваща резултатите от решаването на две системи от уравнения с две неизвестни, формирани от апроксимиращи зависимости от вида (2), (4) и (2), (5). Съвместното

решаване на тези системи с апроксимираща зависимост (1) позволява определянето на стойностите на параметрите на Z_1 и Z_2 на базата на диагностика на температурното разпределение в горещото петно в областта на дефекта.

- III. Процедура за експресно оценяване на локалната повреда по апроксимиращи зависимости от вида (6) позволяващо определянето на теоретичната максимална температура $T_{\max}(Z_1)$, която би се получила в горещото петно при различните нива на Z_1 (-1; 0; +1) в зависимост от стойностите на Z_2 и Z_3 .

По този начин описаните процедури в комбинация с резултати от реални термографски измервания позволяват определяне на остатъчната дебелина на стената Z_3 ; височината на дефекта Z_2 и стойността на дебелината на изолацията пред дефекта Z_1

Така чрез приложение на резултатите от термографските измервания съвместно с тези от визуалната инспекция в изведените апроксимиращи функции може да бъдат определяни размерите на общото износване и локалния дефект, на базата на които да бъде направена оценка на тежестта на повредата и да бъде взето решение за по-нататъшна експлоатация.

Използването на функционалните възможности, които предоставя софтуерът на термовизионните камери, позволява автоматично отчитане на стойностите на измерената максимална температура и тази по зададена линия, съвпадаща с вертикалната ос на горещото петно и успоредна на нея в бездефектната област. При задаване на реалните стойности на условията, при които се извършва измерването (температура на околната среда, влажност на въздуха, разстояние до обследвания обект, степен на чернота на повърхността), необходими за настройване на инфрачервената камера, системния софтуер определя точните стойности на регистрираните температури, които са налични в цифров вид и в комбинация с изведените апроксимиращи зависимости могат да бъдат използвани директно за реализиране на диагностичните процедури.

Това позволява да бъде обобщено, че описаният моделен базиран диагностичен подход, включващ комплексното използване 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 on-line диагностика.

Резултатите от симулацията, експлоатационните правила и експертния опит позволяват да се дефинира система от правила (представени в Таблица 1) за класифициране на повредата. Тъй като $Z_1 \leq Z_3$, равенството е възможно само при липса на локална повреда на изолацията. В правилата за класифициране на повредата е въведено допълнително ниво, когато износването е в границите на 5 mm от максималната допустима стойност ($\varepsilon \leq 0,005m$) и оценяването трябва да се извършва след всеки работен цикъл с цел оценяване на момента на извеждане от експлоатация и безопасното използване на максималния ресурс на стоманоразливната кофа. На основата на това разглеждане са формулирани следните класове на нейното състояние и препоръки:

клас А -- Кофата е изправна, наличното е минимално общо износване, категоризирано като допустимо, но липсва локална повреда ($Z_1=Z_3$)

и се препоръчват регулярни измервания за оценка на износването в резултат на контакта с течната стомана;

клас В -- Налично е износване ($0 < Z_3 \leq +1$) в резултат на контакта с течната стомана със или без локален дефект ($0m < Z_1 \leq +1$) с нисък риск от авария и категоризиране на повредата като допустима – препоръчва се експлоатацията да продължи с провеждане на регулярни термографски инспекции;

клас С -- Налично е износване в резултат на контакта с течната стомана ($-1 + \varepsilon < Z_3 \leq 0$) със или без локален дефект ($-1 + \varepsilon < Z_1 \leq 0$) с нарастващ риск от авария и категоризиране на повредата като умерена - експлоатацията може да продължи при по-чести термографски инспекции и прилагане на локален ремонт в областта на локалната повреда;

клас D -- Налично е износване в резултат на контакта с течната стомана ($-1 < Z_3 \leq -1 + \varepsilon$) със или без локален дефект ($-1 < Z_1 \leq -1 + \varepsilon$) с категоризиране на повредата като умерена, но има риск от авария и следва да се провеждат измервания на всеки следващ цикъл до спиране при достигане на критична стойност, съпътствани с локален ремонт в областта на локалната повреда (при наличие на такава);

клас Е -- Налично е износване в резултат на контакта с течната стомана ($Z_3 \leq -1$) със или без локален дефект ($Z_1 \leq -1$) и категоризиране на повредата като сериозна с изключително голям риск от авария - кофата следва да се изпрати за капитален (основен) ремонт.

Приложението на разработените процедури и формулираната система от диагностични правила позволяват комбинирано използване на резултатите от измерване на повърхностната температурата, визуална оценка и приложение на апроксимиращи зависимости за оценяване на състоянието на изолацията на стоманоразливната кофа, класифициране на повредите и вземане на решение за по-нататъшната експлоатация, поддръжка или ремонт като част от система за предсказващо поддържане с цел безопасно използване на максималния ресурс на стоманоразливните кофи.

Таблица 1. Система от правила за класифициране на повредата.

№		Z_3		Z_1		Клас
R1	: Ако	$0m < Z_3 \leq -1m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	A
R2	: Ако	$0m < Z_3 \leq -1m$	и	$0 < Z_1 \leq +1$	то	B
R3	: Ако	$0m < Z_3 \leq -1m$	и	$-1+e < Z_1 \leq 0$	то	C
R4	: Ако	$0m < Z_3 \leq -1m$	и	$-1 < Z_1 \leq -1+e$	то	D
R5	: Ако	$-1+e < Z_3 \leq 0m$	и	$Z_1 = Z_3$	то	C
R6	: Ако	$-1+e < Z_3 \leq 0m$	и	$0 < Z_1 \leq +1$	то	B
R7	: Ако	$-1+e < Z_3 \leq 0m$	и	$-1+e < Z_1 \leq 0$	то	C
R8	: Ако	$-1+e < Z_3 \leq 0m$	и	$-1 < Z_1 \leq -1+e$	то	D
R9	: Ако	$-1 < Z_3 \leq -1+e$	и	$Z_1 = Z_3$	то	D
R10	: Ако	$-1 < Z_3 \leq -1+e$	и	$0 < Z_1 \leq +1$	то	D
R11	: Ако	$-1 < Z_3 \leq -1+e$	и	$-1 < Z_1 \leq 0$	то	D
R12	: Ако	$-1 < Z_3 \leq -1+e$	и	$-1 < Z_1 \leq -1+e$	то	D
R13	: Ако	$-1+e < Z_3 \leq -1m$	и	$Z_1 \leq -1$	то	E
R14	: Ако	$Z_3 \leq -1$	и	$Z_1 = Z_3$	то	E
R15	: Ако	$Z_3 \leq -1$	и	$-1 < Z_1 \leq +1$	то	E
R16	: Ако	$Z_3 \leq -1$	или	$Z_1 \leq -1$	то	E

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базата на резултати промишлени експерименти, симулационни изследвания, експлоатационните правила и експертния опит е дефинирана система от правила за класифициране на общото износване и локална повреда в стената на стоманоразливна кофа.

Приложението на разработените процедури и формулираната система от диагностични и експлоатационни правила позволяват комбинирано използване на резултатите от термографско измерване на повърхностната температура, визуална оценка и приложение на апроксимиращи зависимости за оценяване на състоянието на изолацията на стоманоразливната кофа, класифициране на повредите и вземане на решение за по-нататъшната експлоатация, поддръжка или ремонт като част от система за предсказващо поддържане с цел безопасно използване на максималния ресурс на стоманоразливните кофи.

REFERENCES

- CHANG L., RUSSELL E., AND BRAATZ R. 2001. *Fault Detection and Diagnosis in Industrial Systems*. Springer.
- ISERMAN R. 2006. *Fault-Diagnosis Systems*, Springer. Thermal Imaging System for a Reliable Condition Monitoring of the Refractory Lining, Available at: http://www.pieper-video.com/upload/pdf/downloads/LadleCheck_EN.pdf
- YEMELYANOV V., YEMELYANOVA N., MOROZOVA O., NEDELKIN A. 2018. Specialized computer system to diagnose critical lined equipment, International Conference Information Technologies in Business and Industry, IOP

Publishing, IOP Conf. Series: *Journal of Physics*: Conf. Series 1015

VIERTAUER A., LAMMER GR., BLOEMER P. 2018. Refractory Condition Monitoring and Lifetime Prognosis, *The Journal of Refractory Innovations*, Buletin 2018, pp.42-46, Available at: <https://www.rhimagnesita.com/bulletin/>.

SEVERSON K., CHAIWATANODOM P., BRAATZ R. 2015. Perspectives on Process Monitoring of Industrial Systems. *IFAC-Papers On Line*, Volume 48, Issue 21, pp. 931-939.

YAN H. S. AND C. XUE G. 2007. Decision-making in self-reconfiguration of a knowledgeable manufacturing system, Jun. 2007, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 45, no. 12, pp. 2735–2758.

CHERNYI S., EMELIANOV V.; ZINCHENKO E.; ZINCHENKO A.; TSVETKOVA, O.; MISHIN A. 2022. Application of Artificial Intelligence Technologies for Diagnostics of Production Structures. *J. Mar. Sci. Eng.*, 10, 259.

PETROVA I., MIHAILOV EM., BOSHNAKOV K. 2019. 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

PETROVA I., MIHAILOV EM. 2020. Determination of defects parameters in infrared diagnosis of steel ladle wall, *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, Volume 55, Issue 6, ISSN 1314-7471 (print) ISSN 1314-7978 (on line) pp. 2158-2166

PETROVA I., MIHAILOV EM. 2018. Model – based diagnosis of metallurgical ladle refractory lining, *The Thirteenth International Conference on Computational Structures Technology*. 4-6 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain.

INCREASING RESOURCE EFFICIENCY BY PREDICTIVE MAINTENANCE OF METALLURGICAL AGGREGATES

Abstract. A procedure is presented for assessing the real condition of steel ladles based on periodic monitoring results as part of a decision-making system for predictive and safe use of their maximum resource.

Keywords: infrared diagnosis metallurgical furnaces; decision-making system; predictive maintenance

JEL: L6; L60; L61

✉ **Prof. Emil Mihailov, PhD**

University of Chemical Technology and Metallurgy
Sofia, Bulgaria

E-mail: emil@uctm.edu

Ivanka Petrova

University of Chemical Technology and Metallurgy
Sofia, Bulgaria

E-mail: ipetrova@uctm.edu

Monika Asenova

University of Chemical Technology and Metallurgy
Sofia, Bulgaria