

**PODWYŻSZENIE JAKOŚCI ODLEWÓW PRZEZ ZASTOSOWANIE NOWOCZESNYCH NARZĘDZI PROJEKTOWANIA I BADANIA**

J. TURZYŃSKI<sup>1</sup>, A. PYTEL, S. PYSZ, R. ŻUCZEK  
Instytut Odlewnictwa, 30-084 Kraków, ul. Zakopiańska 73

**STRESZCZENIE**

Przedstawiono metodykę oraz narzędzia wspomagające proces badania i projektowania ciężkich gabarytowych odlewów, na przykładzie odlewanej metalurgicznej kadzi rozlewniczej o masie  $Q=18t$ . Zastosowanie kamery termowizyjnej pozwoliło precyzyjnie określić dynamiczną mapę rozkładu temperatury całego cyklu technologicznego pracy kadzi rozlewniczej. W celu określenia wad wewnętrznych oraz geometrii odlewu kadzi zastosowano nieniszczące metody badania. Na podstawie wyników badań właściwości mechanicznych i fizycznych, zakresu temperatury pracy kadzi odlewniczej oraz innych realnych parametrów opracowano przestrzenny model, który poddano komputerowej symulacji zjawisk zachodzących podczas pracy kadzi. Otrzymane wyniki zostały wykorzystane do projektowania optymalnej konstrukcji kadzi.

*Key words: process modelling, thermovision examinations, computer simulation*

**1. EKSPLOATACJA METALURGICZNEJ KADZI ROZLEWNICZEJ**

Kadzie o masie  $Q=18t$  są używane w przemyśle metalurgicznym do transportu materiałów ciekłych i stałych. Przewożenie cieczy niemetalowych i metalowych w wysokiej temperaturze powoduje, że po pewnym czasie na jej ścianach i dnie tworzą się skrzepy metaliczne i narost żuźlowy, które są przyczyną znacznego zmniejszenia objętości roboczej kadzi, co zmusza do ich okresowego oczyszczania (wybijania). W trakcie

---

<sup>1</sup> dr inż. Józef Turzyński, tur@iod.krakow.pl

eksploatacji kadzi następuje ich zużywanie. Powstają pęknięcia, które następnie stopniowo powiększają się. W związku z tym jest ustalony podział kadzi do transportu poszczególnych materiałów. Kadzie o najlepszym stanie technicznym bez żadnych oznak uszkodzenia są stosowane do transportu ciekłego metalu. Kadzie z drobnymi pęknięciami są używane do transportu płynnego żużla konwertorowego. Kadzie w których stwierdzono uszkodzenia powłoki na wskroś są używane do transportu materiałów stałych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA WAD KADZI

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że najczęstszymi wadami eksploatacyjnymi kadzi są:

- pęknięcia wylewów (lejów) wzdłużne i poprzeczne,
- wżery w dnie nie kadzi i na wewnętrznej powierzchni,
- pęknięcia przy stopach dna, pęknięcia dna powierzchniowe, pęknięcia dna na wylot, pęknięcia dna na zewnątrz na całym obwodzie,
- pęknięcia wzdłużne ścian.



Rys. 1. Pęknięcia wylewów i siatka pęknięć  
Fig. 1. Cracks and crazing in the ladle nozzle



Rys. 2. Pęknięcie ścianki kadzi  
Fig. 2. Crack in the ladle wall



Rys. 3. Pęknięcie wzdłużne dna kadzi  
Fig. 3. Lengthwise crack in the ladle bottom



Rys. 4. Pęknięcia dna po obwodzie  
Fig. 4. Circumferential crack in the ladle bottom



Rys. 5. Pęknięcie wzdłużne dna  
Fig. 5. Lengthwise crack in the ladle bottom

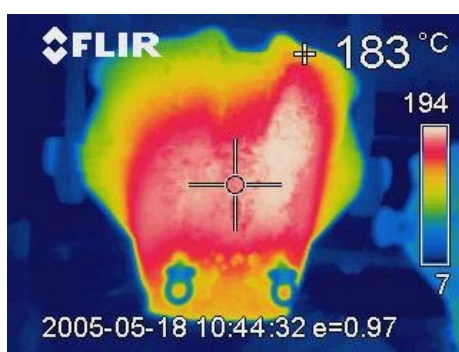


Rys. 6. Wady na ścianie zewnętrznej kadzi  
Fig. 6. Defects on the external ladle wall

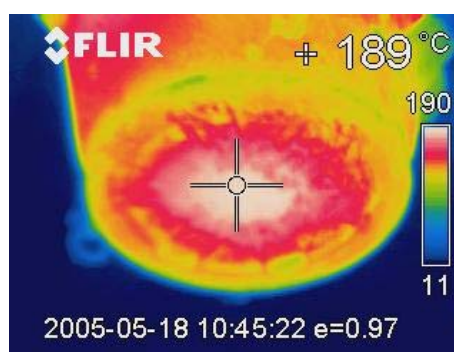
Oprócz przedstawionych wad, których źródłem są warunki eksploatacyjne mogą też występować wady powierzchniowe, których geneza powstania związana jest z procesem technologicznym wytwarzania kadzi. Wady te typu pęcherzy zewnętrznych i nakłuc mogą powstawać przy zbyt dużej wilgotności formy lub rdzeni, niewystarczającej przepuszczalności formy lub rdzeni oraz innych czynników. Wady te mogą przyczyniać się do osłabienia ścianki kadzi, poprzez zapoczątkowanie mikropęknięć (rys. 6).

## 2. ROZKŁAD TEMPERATURY PODCZAS PRACY KADZI

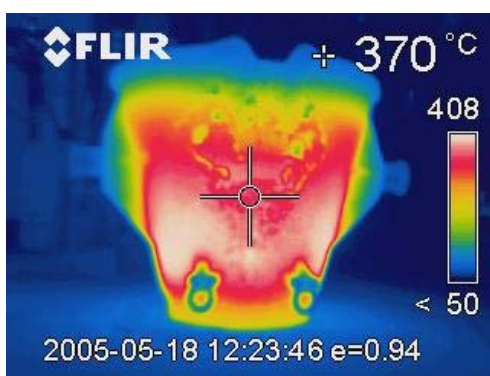
W celu określenia pola rozkładu temperatury kadzi w czasie pracy, wykonano badania kamerą termowizyjną oraz pirometrem optycznym z celownikiem laserowym. Pomiarom zostało poddane 9 kadzi. Ogólnie wykonano 54 pomiary. Rejestrowano szczegółowe dane pomiarów z numerem termogramu, godziną pomiaru, numerem kadzi, opisem stanu kadzi i maksymalną temperaturą nagrzania ścian.



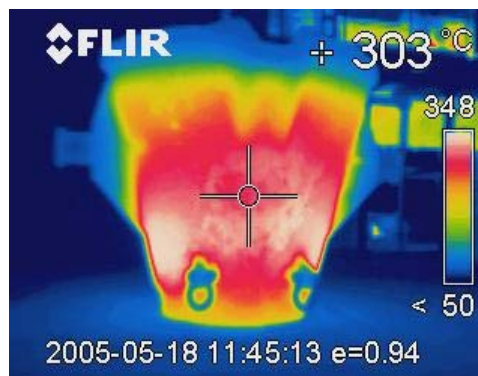
Rys. 7. Nierównomierne stygnięcie ścian kadzi  
Fig. 7. Non-uniform cooling of the ladle walls



Rys. 8. Rozkład temperatury dna kadzi  
Fig. 8. Temperature distribution in the ladle



Rys. 9. Rozkład temperatury po wylaniu metalu  
Fig. 9. Temperature after pouring out of metal



Rys. 10. Lokalne przegrzanie ścian kadzi  
Fig. 10. Local overheating of the ladle walls

Na podstawie analizy wyników badań wykonanych kamerą termowizyjną i pirometrem laserowym stwierdzono:

- Przyczyną nierównomiernego nagrzewania kadzi i lokalnego przegrzewania jest zarówno specyfika konstrukcji, jak i błędy wykonawcze tj. różnice grubości ścian kadzi, wady wewnętrzne oraz nierównomierna grubość wyłożenia ogniotrwałego.
- Najwyższa temperatura mierzona na powierzchni zewnętrznej kadzi lejniczej podczas procesu technologicznego w centralnym punkcie dna kadzi wynosi około  $530^{\circ}\text{C}$ , a na obrzeżach dna  $490^{\circ}\text{C}$ . W tym samym czasie temperatura w rejonie wylewu wynosi około  $170^{\circ}\text{C}$ .
- Nierównomierny rozkład temperatury w kadzi lejniczej zarówno wzdłuż pionowej osi podziału, jak również w poszczególnych strefach.
- W wyniku dużego gradientu temperatury w kadzi tworzy się nierównomierny rozkład naprężeń.

### 3. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH MATERIAŁU KADZI

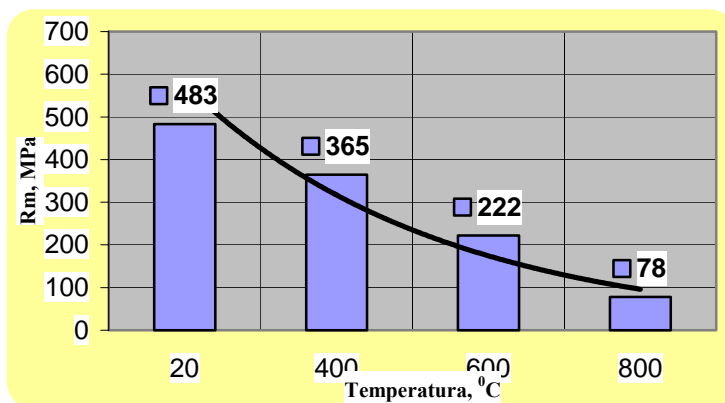
Analiza składu chemicznego próbek materiału kilku kadzi przeprowadzona w Instytucie Odlewnictwa wykazała, że kadzie wykonane są ze staliwa węglowego konstrukcyjnego ogólnego przeznaczenia (wg PN-ISO 3755). Na podstawie charakterystyk materiałowych wybranych kadzi, wg świadectw badań odbiorczych, przeprowadzona analiza porównawcza składów chemicznych staliwa i własności mechanicznych nie wykazała odstępstw od cytowanej normy. Wyniki badań wytrzymałości materiału kadzi jednoznacznie wskazują na znaczące obniżanie się wytrzymałości tworzywa ze wzrostem temperatury. Istotne znaczenie ma więc dokładne wykonanie wyłożenia ogniotrwałego. W przypadku nierównomiernej grubości wyłożenia, powstają lokalne prze-

grzania ścianki kadzi, koncentracja naprężeń i powstawanie pęknięć. Badania dylatometryczne polegające na nagrzewaniu i schładzaniu próbek pozwoliły określić temperaturę przemian fazowych i zależność współczynnika rozszerzalności cieplnej materiału kadzi od temperatury. Przemiana  $Fe\alpha \rightarrow Fe\beta$  i odwrotna powodują zmianę objętości właściwej staliwa w zakresie temperatur. Lokalne nagrzanie ścianek kadzi do temperatur przemian może być początkiem mikropęknięć.

#### 4. KOMPUTEROWA ANALIZA KONSTRUKCJI KADZI

Analizę rozkładu naprężeń kadzi przeprowadzono wykorzystując pakiet programowy ABAQUS. Program ten, bazując na metodzie elementów skończonych umożliwia rozwiązywanie szeregu zagadnień inżynierskich, począwszy na symulacji zjawisk liniowych, aż do analizy skomplikowanych problemów nieliniowych. W przeprowadzonej symulacji numerycznej wykorzystano następujące moduły programu:

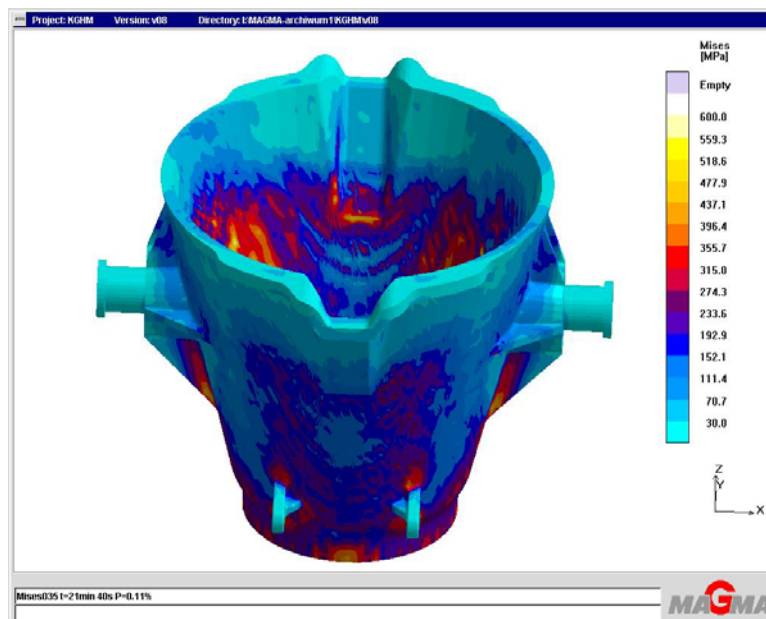
- **ABAQUS/Standard** – umożliwia analizę rozkładu naprężeń i przemieszczeń w konstrukcjach, przepływu ciepła, symulację zjawisk akustycznych, itd.
- **ABAQUS/Explicit** – zaawansowany moduł umożliwiający analizę zjawisk dynamicznych.
- **ABAQUS/CAE** – moduł służący do dyskretyzacji zaimplementowanego modelu, będący jednocześnie preprocesorem i postprocesorem systemu metody elementów skończonych.



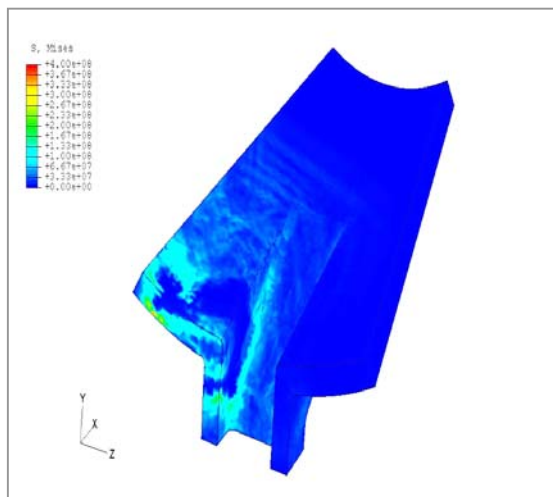
Rys. 11. Zależność wytrzymałości tworzywa kadzi od temperatury  
Fig. 11. Ladle material strength vs temperature

Konsekwencją nierównomiernego nagrzewania są zawsze naprężenia własne, których wartości zwiększają się wraz ze wzrostem prędkości chłodzenia. Nagrzewanie

kadzi od środka wywołuje naprężenia i przemieszczenia, które w trakcie cyklicznego obciążenia cieplnego mogą powodować w skrajnych przypadkach pęknięcia. Takie pęknięcia zaobserwowano na dnie kadzi - rys. 3. Wartość maksymalnych naprężeń w niektórych miejscach dochodzi do 300 MPa. Uwzględniając zależność wytrzymałości materiału od temperatury ta wielkość naprężeń jest bardzo duża. Oczywiście są to naprężenia lokalne i krótkotrwałe dlatego nawet ich przekroczenie nie wpływa od razu na zniszczenie kadzi. Jednak cykliczne działanie zdecydowanie wpływa negatywnie na jej trwałość. Obserwując kolejne etapy obciążania kadzi można zauważyć równomierny początkowo rozwój pola naprężeń w kierunku dna kadzi. Analizując jednak dalsze etapy zaobserwować możemy, iż pole naprężeń zmierza również w kierunku góry dziobu, czyli w kierunku miejsca powstawania pęknięć. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że następuje koncentracja naprężeń w górnej części dzioba, a następnie przenosi się wzdłuż krawędzi w kierunku dna. Koncentracja naprężeń w tym miejscu może doprowadzić do zainicjowania procesu pęknięcia konstrukcji.



Rys. 12. Rozkład naprężeń kadzi z ciekłym metalem  
 Fig. 12. Distribution of stresses in ladle filled with metal



Rys. 13. Rozkład naprężeń podczas wybijania wyłożenia  
 Fig.13. Distribution of stresses during knocking out of lining

## 5. WNIOSKI

1. Nowoczesne narzędzia badawcze zastosowane w niniejszej pracy pozwoliły stworzyć wiarygodny model zjawisk zachodzących podczas eksploatacji metalurgicznej kadzi rozlewniczej.
2. Zastosowany pakiet programowy ABAQUS w połączeniu z wynikami badań materiałowych w podwyższonej temperaturze w znacznym stopniu ułatwił analizę przyczyn pojawiania pęknięć w metalurgicznej kadzi rozlewniczej.
3. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że podczas eksploatacji następuje koncentracja naprężeń w górnej części dzioba, a następnie przenosi się wzdłuż krawędzi w kierunku dna. Koncentracja naprężeń w tym miejscu może doprowadzić do zainicjowania procesu pęknięcia konstrukcji.
4. Lokalizacja pęknięć określona na podstawie symulacji komputerowej pokrywa się z rzeczywistym polem rozkładu pęknięć.
5. Analiza przyczyn i mechanizmu destrukcji stanowić będzie podstawę do optymalizacji konstrukcji rozlewniczej kadzi metalurgicznej.

## LITERATURA

- [1] Turzyński J., Pytel A., Pysz S., Żuczek R.: *Określenie optymalnych parametrów eksploatacyjnych metalurgicznej kadzi rozlewniczej w celu eliminacji uszkodzeń i wydłużenia ich żywotności*. Praca badawcza Instytutu Odlewnictwa, Kraków 2005r.

## **IMPROVING CASTING QUALITY THROUGH APPLICATION OF MODERN TOOLS FOR DESIGNING AND TESTING**

### **ABSTRACT**

The methods and tools aiding the process of designing and testing of the heavy castings of large overall dimensions, basing on the example of a cast metallurgical ladle of the total weight  $Q=18t$ , were described. The use of thermovision camera enabled making a very exact map of the dynamic temperature distribution during the entire ladle operating cycle. To determine the presence of internal defects and the cast ladle geometry, a non-destructive testing technique was applied. The results of the mechanical tests and examinations of the physical properties, along with determination of the ladle operating temperature range and of other operating parameters were used to design a 3D model, which next served in computer simulation of the phenomena taking place during the ladle operation. The obtained results helped in preparing an optimum design of the ladle.

Recenzował: Prof. Jerzy Sobczak