

PEKNIĘCIA NA GORĄCO ODLEWÓW STALIWNYCH PROBLEMEM CIĄGLE NIEROZWIĄZANYM

S. JURA¹, J. CYBO², Z. JURA³.

^{1,3} Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice,

² Katedra Materiałoznawstwa, Wydział Techniki, Uniwersytet Śląski
ul. Śnieżna 2, 41-200 Sosnowiec

STRESZCZENIE

Problem pęknięć na gorąco odlewów staliwnych opisano funkcją typu „S” stosując próbkę technologiczną opracowaną przez Althoffa-Radtkego. Przeprowadzone badania procesu metalurgicznego oraz jakości metalurgicznej staliwa i zastosowanie metod statystyki matematycznej pozwoliły na określenie czynników, które w sposób istotny wpływają na pęknięcia na gorąco odlewów staliwnych.

Key words: shrinkage, thermal expansion, steel alloys.

1. WSTĘP

Wytwarzanie odlewów jest fizycznie bardzo złożonym procesem. Ciekły metal wlane do formy stygnie do temperatury likwidus. Dzięki ciągłemu odbiorowi ciepła w granicach temperatur likwidus – solidus zachodzi krystalizacja. Proces przechodzenia ciała ze stanu ciekłego do stałego związany jest nie tylko z krystalizacją, ale również z segregacją i krystalizacją różnych faz. Zjawiskom stygnięcia towarzyszy nieodłącznie skurcz odlewu. Ponieważ stygnięcie w różnych miejscach charakteryzuje się różnym gradientem to, w objętości odlewu pojawia się różny skurcz, co wywołuje różny stan naprężeń. Oczywiście pojawia się pytanie, jaki jest ten stan naprężeń, kiedy jest niebezpieczny powodując pęknięcie odlewu. Naprężenia wywołują odkształcenia a

¹ prof. dr hab. inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

² dr hab. inż., jcybo@metrolo1.tech.us.edu.pl

³ dr inż. zjura@silesia.pik-net.pl

komasacja odkształceń lokuje się w węzłach cieplnych, w których znajdują się mogą obszary dwufazowe ciecz – ciało stałe. Dzięki segregacji na granicach faz istnieje ciecz charakteryzująca się niską temperaturą krzepnięcia. Warstwa taka, nawet przy niskich naprężeniach wewnętrznych pęka. Powstanie szczeliny powoduje koncentracje energii i dalsze powiększanie się pęknięcia aż do sytuacji katastroficznej (pęknięcia na całym przekroju). Początek powstawania szczelin mogą stanowić wtrącenia niemetaliczne.

Grubość warstwy ciekłej między kryształami może być traktowana jako długość pęknięcia początkowego. Gęstość energii odkształcenia powodujące pęknięcie odlewu można opisać zależnością [1,2,3]

$$W = \frac{E_{SL}}{h} = \frac{E_{SL}}{r \cdot L\sqrt{3}} \quad (1)$$

gdzie: W – gęstość energii odkształcenia warstwy międzyziarnowej, h – grubość warstwy, E_{sl} - energia międzyfazowa ciecz – ciało stałe, L – udział fazy ciekłej w węzle cieplnym, r – promień ziarna (koła opisanego na przekroju ziarna).

Krytyczne naprężenia powodujące pęknięcie w ciałach stałych według Griffitha-Orowana opisuje zależność:

$$\sigma_{kr} = \left[\frac{2E}{1-\nu^2} \frac{E_{ef}}{\pi \cdot c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

gdzie: E – moduł sprężystości podłużnej, ν - liczba Poissona, E_{ef} - efektywna energia powierzchniowa, c – połowa długości mikroszczeliny Griffitha.

Wzór ten jest możliwy do stosowania dla ciała stałego. Próba zastosowania wzoru do ciał dwufazowych ciecz – ciało stałe lub do ciał stałych w temperaturach bliskich solidusu jest niezwykle trudna. Właściwie każdy parametr tego wzoru jest nieznanymi i równocześnie niemożliwy do określenia.

Inną klasyczną zależnością opisywaną w podręcznikach są wzory:

- na wydłużenie sprężyste

$$\Delta L = \frac{\sigma \cdot L}{E} \quad , \quad (3)$$

- na skurcz cieplny

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad . \quad (4)$$

gdzie: Δl - skurcz próbki lub wydłużenie pod wpływem naprężeń rozciągających, σ - naprężenia rozciągające, L – długość badanej próbki, E – moduł sprężystości podłużnej, α - cieplny współczynnik skurczu.

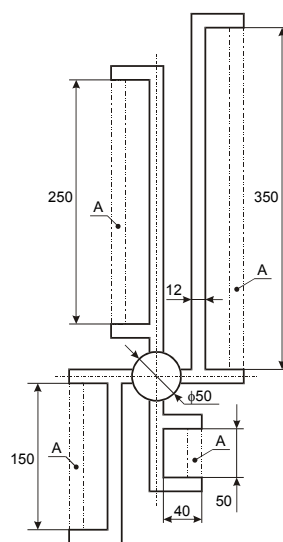
Oczywiście wzory te dotyczą ciała stałego o jednakowych właściwościach w całej objętości próbki. Korzystając z zasady równomierności odkształceń zmiana długości

próbki jest jednakowa dla wydłużenia i skurczu. Aby określić stan naprężeń konieczna jest znajomość wszystkich wielkości fizycznych. Określenie tych wielkości dla odlewu w całym zakresie temperatur jest niemożliwe. W realnym odlewie trudności te powiększa różna temperatura w każdym miejscu odlewu. W jednym miejscu metal już zakrzepł całkowicie i przy określonej temperaturze zachowuje się jako ciało sprężyste a w innym miejscu jeszcze część metalu znajduje się w stanie ciekłym. Objętości ciekłe należy traktować jako nieciągłości, które są źródłem powstawania pęknięć.

Sposób krystalizacji ma w tym przypadku podstawowe znaczenie. Wielkość oraz rozmieszczenie tych objętości zależy od wielkości krystalizujących dendrytów (kryształów). Inne defekty struktury jak np. liczba i wielkość wtrąceń też mogą być źródłem początku pęknięć. Ten ograniczony przegląd pozwala wysnuć wnioski o trudnościach jakie mogą się pojawić w badaniach i procesach technologicznych dla oceny przyczyn pęknięć na gorąco, jak również otrzymania odlewów bez pęknięć.

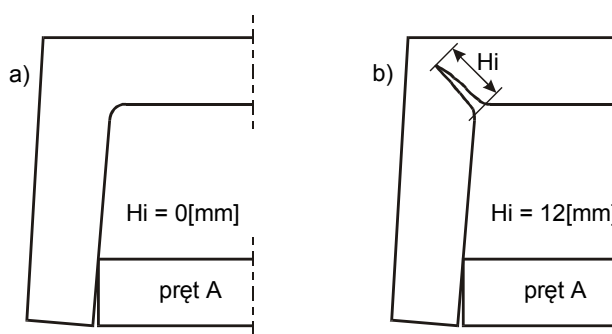
2. WYBÓR PRÓBY DO OCENY PĘKNIĘĆ ODLEW

Z teoretycznego punktu widzenia każda metoda badań jest poprzana, jeżeli jest zgodna z prawami mechaniki i wytrzymałości z uwzględnieniem odkształceń. Jednak te wszystkie próby wymagają znajomości właściwości fizycznych materiałów w szczególności w wysokich temperaturach. Określenie tych parametrów jest niezwykle trudne. Przyjmowanie przybliżeń i uproszczeń do wszelkiego rodzaju obliczeń może prowadzić do wyników dalekich od rzeczywistości. Po przeanalizowaniu wielu metod badawczych przyjęto próbę Althoffa-Radtkego. Wzór tej próby przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Model odlewu Althoff-Radtke (A – pręt oporowy)
 Fig. 1. Model of Althoff-Radtke casting (A – resistance bar)

Jest to próba kształtu klamry [4,5]. Ramiona klamry rozparte są prętem o takim samym przekroju jak próbka klamrowa. Węzeł cieplny próby powstaje w narożnikach klamry. Próba ta ma jednoznacznie zlokalizowane pęknięcie. Klamra po zalaniu kurcząc się o „ ΔL ” powoduje odgięcie ramion. Rozpórka „A” nie pozwala im przesunąć się równoległe do ramionom. Pojawiające się sytuacje przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Przykłady odgięcia „a” i pęknięcia „b” próby Althoffa-Radtkego („A-R”)
Fig. 2. Examples of bending „a” and cracking ‘b” of Althoff-Radtke test („A-R”)

Jeśli odlew cechuje się małą skłonnością do pęknięć to ramię klamry się wygnie a pęknięcie nie pojawi się przy tym odkształceniu. Stan taki przedstawiono na figurze „a”. Natomiast na figurze „b” przedstawiono sytuację, kiedy klamra w narożniku pękła. Pręt rozporowy powoduje odgięcie ramion wymuszając pęknięcie klamry w narożniku. Tego rodzaju wynik będzie wskazywał, że stop cechuje się małą odpornością na gorące pęknięcia odlewu. Takie porównawcze badanie ważne jest tylko dla takiego samego skurczu ΔL , czyli zgodnie ze wzorem 3 i 4 dla tej samej długości klamry.

Próba „A-R” posiada 4 różne długości klamry co kwalifikuje ją jako próbę ilościową uwzględniającą różny skurcz ΔL . Długość szczeliny pękniętego narożnika oraz długość poszczególnych klamer (50 – 350 mm) stanowią parametry skłonności staliwa do pęknięć.

3. FUNKCYJNY OPIS PĘKNIĘĆ W PRÓBIE „A-R”

Obecnie rozwinięte metody analiz statystycznych pozwalają na poszukiwanie związków z określoną wielkością (parametrem, cechą) próby a zmiennymi niezależnymi. Podstawowym jednak warunkiem jest staranny zbiór danych. Oczywiście, aby wynik analiz statystycznych był prawdziwy wymagane jest odpowiednia liczba doświadczeń.

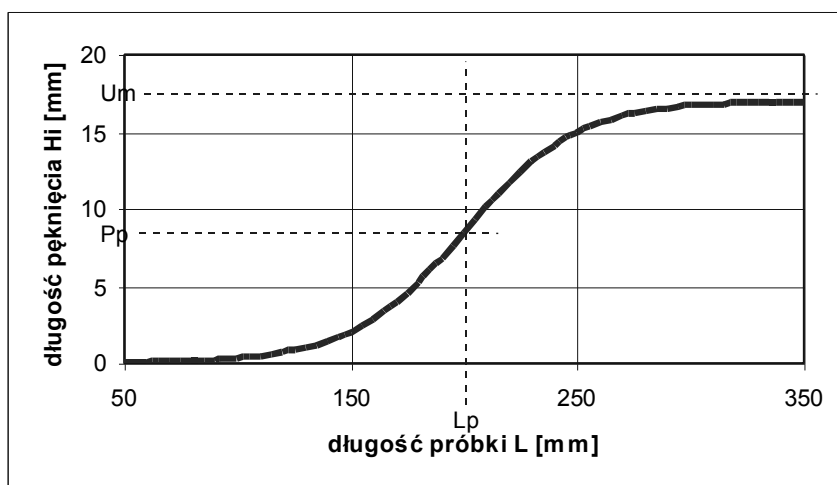
W przypadku badania skłonności staliwa do pęknięć przy pomocy próby „A-R” należy wyniki unormować do postaci funkcji opisującej wynik próby. Opisowi temu muszą być poddane wszystkie próby a parametry funkcji opisującej stanowią zbiór danych do obliczeń statystycznych.

Przyjęto, że do opisu wyników próby „A-R” nadaje się najlepiej funkcja logistyczna

$$H_i = \frac{U_m}{1 + \exp(z(L_p - L))} \quad (5)$$

gdzie: H_i - długość pęknięcia dla długości L próbki kłamrowej, L_p - długość kłamry przy której nastąpi pęknięcie do połowy przekroju narożnika, z - współczynnik intensywności pęknięcia, U_m - pęknięcie dla pełnego przekroju narożnika (w przypadku próby przedstawionej na rys.1 długość ta wynosi 17 mm).

Postać graficzną funkcji (5) przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Długość pęknięcia H_i próby A-R w zależności od długości próbki (kłamry)
 Fig. 3. The length of H_i test cracking taking into account sample length (clamp)

Według wzoru (5) opracowano funkcję dla 28 prób technologicznych „A-R”. Parametry U_m , z , L_p wyliczone dla każdej próby cechowały się bardzo wysokimi parametrami statystycznymi (korelacja $R > 0,99$).

Równocześnie wiadomo, że skłonność do pęknięć na gorąco zależy od sposobu krystalizacji staliwa, od technologii wytapiania i stopnia czystości staliwa. Dla określenia niektórych parametrów jakości metalurgicznej wykonano wypyty staliwa L20G. Wszystkie próbki poddano analizie chemicznej, analizie stereologicznej struktury metalograficznej oraz wtrąceń niemetalicznych. Zbierano również dane z przebiegu procesu wytapiania staliwa L20G.

4. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW BADAŃ

Zbiór danych z badań stanowiły wyniki:

- analizy chemicznej staliwa,
- parametrów funkcji H_i pęknięć na gorąco,
- zawartości gazów,
- parametrów procesu metalurgicznego,
- badań metalograficznych i stereologicznych wtrąceń niemetalicznych.

Do analizy statystycznej zastosowano metodę regresji krokowej pozwalającej na eliminację parametrów nieistotnych.

Krytyczną (połowiczną) długość pęknięć próby „A-R” określa następująca zależność eksperymentalna:

$$L_p = 943 - 2,92 \text{ CaO} - 1,59 \text{ tr} + 8,54 \text{ CaSi} - 227,6 \text{ Mn} - 4668 \text{ P} - 9864 \text{ S} - 1,12 \text{ Ox} + 0,843 \cdot \text{N} \quad (6)$$

o parametrach statystycznych:

- odchylenie standardowe: $dL_p = 36$ [mm]
- współczynnik korelacji: $R = 0,81$
- test wiarygodności: $W = 2,27$

Na zwiększenie połowicznej długości pęknięć w próbie „A-R” mają: zwiększenie dodatku CaSi oraz zwiększanie zawartości azotu (N). Natomiast dodatek wapna (CaO) w drugim etapie rafinacji, czas trwania rafinacji (tr), duża zawartość manganu (Mn), fosforu (P), siarki (S) i tlenu zmniejszają L_p czyli zwiększają skłonność do pęknięć na gorąco.

Jeżeli rozważy się elementy technologiczne procesu wytapiania staliwa i wtrącenia niemetaliczne to zależność eksperymentalną opisuje wzór:

$$L_p = 519 - 4,7 \text{ FeMn} - 1,5 \text{ CaO} - 16 \text{ Al} + 8,9 \text{ CaSi} + 20 \text{ H} \quad (7)$$

o parametrach statystycznych:

$$dL_p = 29 \text{ [mm]}, R = 0,82; W = 2,60$$

Korzystanie na zmniejszenie skłonności staliwa do pęknięć na gorąco wpływają: dodatek wapniorkrzemu (CaSi) oraz zwiększenie odległości między wtrąceniami niemetalicznymi (H). Co jest równoznaczne ze zwiększoną czystością staliwa. Natomiast zmniejszenie dodatku żelazomanganu FeMn oraz wapna (CaO) w okresie rafinacji jest konieczne dla zwiększenia L_p czyli zmniejszenia skłonności do pęknięć na gorąco. Niekorzystnym jest również wprowadzanie nadmiernej ilości aluminium do kadzi.

Intensywność wzrostu pęknięcia lub bardzo wąski zakres długości (H_i) pęknięcia na całym przekroju opisuje parametr z . Jeżeli zakres długości próby A-R przy którym następują pęknięcia H_i jest szeroki to w odlewie pojawić się może szereg drobnych

pęknięć a pęknięcie na całym przekroju próby A-R pojawi się dla kłamry o dużej długości. Intensywność wzrostu pęknięcia opisuje zależność eksperymentalna:

$$Z_p = 2,86 + 0,036 \text{ FeSi} - 0,005 \text{ tSi} - 0,006 \text{ CaO} - 0,07 \text{ Al} + 0,05 \text{ CaSi} - 0,4 \text{ Mn} - 0,57 \text{ V} - 0,06 \text{ D} - 26,6 \text{ P} + 0,005 \text{ Ox} \quad (8)$$

o parametrach statystycznych:

$$d Z_p = 0,15 [1/\text{mm}]; R = 0,88; W = 3,0$$

Na zwiększenie intensywności wzrostu pęknięć wpływają: dodatek żelazokrzemu (FeSi) na początku rafinacji oraz dodatek wapniokrzemu (CaSi). Natomiast zmniejszają ten parametr późne dodawane żelazokrzemu (tSi) dodatek wapna (CaO) w drugim okresie rafinacji, duża zawartość manganu (Mn), udział objętościowy V wtrąceń niemetalicznych, średnica D wtrąceń niemetalicznych oraz zawartość fosforu (P), siarki (S). Dla tych badań korzystnym okazuje się zwiększona zawartość tlenu (Ox).

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione opracowanie wskazuje, że metoda A-R badania skłonności staliwa do pęknięć na gorąco może być traktowana jako próba ilościowa. Przyjęcie zaproponowanej funkcji opisującej pęknięcia na gorąco H_i staliwa pozwala na unifikację wielu różnych obserwacji w próbie Alhoffa-Radtke'go. Analizę można sprowadzić do oceny długości kłamry próby A-R przy której pojawi się pęknięcie „ L_p ” do połowy narożnika. Bardzo ważnym jest również zakres pęknięć. Zakres ten jest zależny od wielkości „ Z ”. Im większy jest parametr Z określający intensywność pęknięć tym mniejszy jest zakres długości ramion próby A-R. przy której następuje pęknięcie.

Analizując równania eksperymentalne 5,6,7 należy dążyć aby uzyskiwać jak największe L_p i Z . Tak się złożyło w wyniku badań eksperymentalnych, że dla obu wielkości parametry wytwarzania oddziałują jednokierunkowo. Analiza równań wskazuje również jak prowadzić proces technologiczny aby uzyskiwać maksymalne wartości L_p i Z .

LITERATURA

- [1] Parkitny R., Szczygiol N.: Termomechanika krzepnięcia stopów metali w ujęciu makro i mikroskopowym. Praca OPBP 02.09/89. Pol.Częstochowska
- [2] Bennet S., Bevries K., Williams M.: Adhesive Fracture Mechanics. Inst. Journal of Fracture 1974, nr 10, s.33
- [3] Anderson G.P., Devries K.L., Williams M.: Mixed Mode Stress Field Effect in Adhesive Fracture. Inat.Janruar of Fracture. 1974, nr 10, s.56
- [4] Cybo J., Jura S., Chmiela J.: Wpływ procesu metalurgicznego na dekohezję odlewu podczas krzepnięcia i eksploatacji. ZN Pol.Śl., Mechanika nr 123, s.19-33

- [5] Cybo J., Jura S., Wieczorek M.: Wpływ czynników metalurgicznych na zanieczyszczenia odlewu staliwnego wtrąceniami niemetalicznymi i skłonność do pęknięć na gorąco. Krzepnięcie Metali i Stopów. PAN Katowice 1988, nr 13.

**HOT SHRINKAGES OF CAST STEEL ALLOYS ARE STILL
AN OUTSTANDING PROBLEM**

SUMMARY

The problem of hot shrinkage's of cast steel iron alloys has been described by function "S" type, using technological test elaborated by Althoff-Radtke. Investigations conducted on metallurgical process and metallurgical quality of cast steel as well as application of mathematical statistics methods allowed to define factors which highly influenced hot shrinkage's of cast steel alloys.

Recenzował Prof. Józef Gawroński