

BADANIE PROCESU KRZEPNIĘCIA ODLEWU W KOKILI GRUBOŚCIENNEJ PRZY MAŁEJ INTENSYWNOŚCI STYGNIECIA

1. Model procesu krzepnięcia odlewu w formie metalowej

Przyjęty model badanego procesu wymiany ciepła składa się z następujących założeń upraszczających:

- a) odlew jest płytą nieograniczoną w sensie cieplnym,
- b) forma metalowa spełnia warunek półprzestrzeni, czyli jej powierzchnia zewnętrzna nie traci ciepła do otoczenia,
- c) pomiędzy formą i odlewem występuje stały opór cieplny szczeliny,
- d) duża wartość oporu cieplnego zapewnia małą intensywność stygnięcia odlewu,
- e) właściwości termofizyczne materiału formy i metalu odlewu są stałe,
- f) proces wymiany ciepła zachodzi przy warunkach brzegowych 3. rodzaju, opisywanych wartością zastępczego współczynnika wymiany ciepła w szczelinie.

Zastosowanie grubej warstwy izolacyjnej, opóźniającej proces stygnięcia na powierzchniach brzegowych odlewu płyty, pozwala na traktowaniu kształtu odlewu jako płyty w sensie cieplnym i spełnienie pierwszego założenia.

2. Warunki brzegowe

Są one ważnym elementem składowym tzw. warunków jednoznaczności. Rozróżniamy 4 rodzaje tych warunków.

Warunki brzegowe 1. go rodzaju (WB1r) polegają na ujęciu rozkładu temperatury na powierzchni kontrolnej układu w rozpatrywanym zakresie czasowym, czyli na zadaniu funkcji ogólnego typu

$$T_{pow} = f(x, y, z, \tau)$$

Przykładem szczególnym i najczęściej stosowanym są tzw. ustalone warunki brzegowe, co można zapisać w postaci:

$$T_{pow} = const$$

co oznacza niezmiennosć temperatury na powierzchni układu w czasie trwania procesu wymiany ciepła ([1] - s. 30).

Warunki brzegowe 3. go rodzaju (WB3r) polegają na zadaniu temperatury otoczenia układu oraz na zadaniu prawa wymiany ciepła z otoczeniem. W najczęściej stosowanym przypadku kinetykę procesu cieplnego ujmuje tzw. współczynnik wymiany ciepła użyty przez Newtona w równaniach opisujących gęstość strumienia cieplnego. Rozróżnia się tu dwa przypadki :

- dla procesu stygnięcia układu

$$q = \alpha(T_{pow}(\tau) - T_{ot}), \quad (3)$$

- dla procesu nagrzewania

$$q = \alpha(T_{ot} - T_{pow}(\tau)) \quad (4)$$

gdzie:

α - współczynnik wymiany ciepła [W/(m²K)]

T_{ot} - temperatura otoczenia.

Warunki brzegowe drugiego rodzaju polegają na odpowiednim określeniu strumienia cieplnego i stosowane są bardzo rzadko. Natomiast warunki brzegowe 4. rodzaju są bardzo przydatne w ujęciu procesu krzepnięcia metodą symulacji numerycznej.

3. Analiza procesu nagrzewania półprzestrzennej formy metalowej

W klasycznej teorii wymiany ciepła na drodze przewodzenia [1] istnieje rozwiązanie równania różniczkowego przewodzenia ciepła dla półprzestrzeni i ustalonych warunków brzegowych trzeciego rodzaju. Rozwiązanie to ma sens opisu nieustalonego pola temperatury i można je w ogólnej, uproszczonej postaci zapisać:

$$\frac{T-T_{2p}}{T_{pow}-T_{2p}}=f(Fo_x, Bi_x) \quad (1)$$

gdzie :

T - temperatura półprzestrzeni,

Fo_x - kryterium Fouriera, $Fo_x = \frac{a_2 \tau}{x^2}$

Bi_x - kryterium Biota $Bi_x = \frac{\beta}{\lambda_2} x$

a_2 - współczynnik wyrównywania temperatury materiału półprzestrzeni,

λ_2 - współczynnik przewodzenia ciepła (materiału półprzestrzeni),

β - współczynnik wymiany ciepła na powierzchni granicznej (tzw. kontrolnej),

T_{pow} - temperatura powierzchni półprzestrzeni,

T_{2p} - temperatura początkowa formy [°C lub K],

x - odległość punktu od powierzchni,

τ - czas.

Wartość strumienia cieplnego na powierzchni wewnętrznej kokili jest proporcjonalna do gradientu temperatury (prawo Fouriera). Wartość gradientu wyznacza się obliczając pochodną według równania opisującego pole temperatury półprzestrzeni przy ustalonych warunkach brzegowych 3. rodzaju (równanie 1). Założenia modelowe pozwalają na zastąpienie temperatury powierzchni temperaturą krzepnącego metalu.

Istotne znaczenie ma równanie opisujące wartość strumienia cieplnego, pobieranego (w przypadku formy odlewniczej) na powierzchni kontrolnej:

$$q=\beta(T_{kr}-T_{2p})\exp(z^2)\operatorname{erfc}(z) \quad [W/ m^2] \quad (2)$$

gdzie:

β - zastępczy współczynnik wymiany ciepła pomiędzy formą i powierzchnia stygnięcia odlewu [W /m²K],

T_{kr} - temperatura krzepnięcia odlewu [°C lub K],

T_{2p} - temperatura początkowa formy [°C lub K],

z - parametr (bezwymiarowy czas) równy $z = \frac{\beta}{b_2} \sqrt{\tau}$,

b_2 - współczynnik akumulacji ciepła dla formy, [$Ws^{1/2}/m^2K$],

τ - czas.

Z definicji gęstości strumienia cieplnego (przyjęto używać skrótowo nazwy: ” strumień cieplny”) mamy

$$q = \frac{dQ}{F d\tau}$$

czyli

$$dQ_{ak} = q F d\tau = (T_{kr} - T_{2p}) \exp(z^2) \operatorname{erfc}(z) F d\tau \quad (3)$$

Całkowanie równania (3) pozwala uzyskać zależność opisującą ciepło akumulowane w formie półprzestrzennej:

$$Q_{ak} = \frac{1}{\beta} b_2^2 J_{kr} F \left[\frac{2z}{\sqrt{\pi}} - 1 + \exp(z^2) \operatorname{erfc}(z) \right] \quad [J] \quad (4) \text{ gdzie:}$$

$$\mathcal{G}_{kr} = T_{kr} - T_{2p} \quad [K]$$

Wartość ciepła akumulowanego jest rosnącą funkcją czasu trwania procesu nagrzewania, który ukryty jest w bezwymiarowym parametrze ‘z’. Po wprowadzeniu 4. pomocniczych kryteriów zależność (4) może być uproszczona do postaci:

$$Q_{ak} = K_1 (K_2 + K_3 K_4) \quad [J] \quad (5)$$

gdzie:

$$K_1 = \frac{1}{\beta} b_2^2 \mathcal{G}_{kr} F \quad [J],$$

$$K_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} z - 1, \quad [\text{bezwymiarowe}]$$

$$K_3 = \exp(z^2), \quad [\text{bezwymiarowe}],$$

$$K_4 = \operatorname{erfc}(z), \quad [\text{bezwymiarowe}].$$

$$F \quad - \text{powierzchnia stygnięcia odlewu (powierzchnia nagrzewania formy), [m^2].}$$

Równanie (5) wyraża jedynie sposób uproszczenia procedury obliczeń i nie może być traktowane jako odpowiedź na pytanie o parametry decydujące o procesie akumulacji ciepła. Analiza równań (3, 4) pozwala na wstępne, uproszczone stwierdzenie, że ciepło akumulowane w formie półprzestrzennej jest funkcją sześciu podstawowych składników:

$$Q_{ak} = f(\beta, b_2, T_{kr}, T_{2p}, F, \tau) \quad (6)$$

Uwzględniając jednak, że zastępczy współczynnik wymiany ciepła β jest funkcją kilku parametrów ($X_1, E_j, X_p, \lambda_p, \lambda_{gaz}$), można też ostatecznie stwierdzić, że ciepło akumulowane w formie półprzestrzennej jest funkcją 10. parametrów.

Problem zastępczego współczynnika wymiany ciepła - z wyjaśnieniem pięciu ww. parametrów - będzie wyjaśniony poniżej.

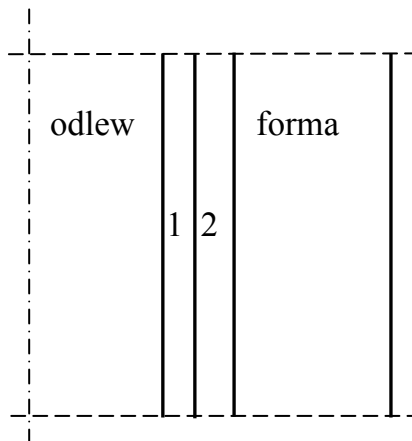
4. Zastępczy współczynnik wymiany ciepła dla szczeliny

Pod pojęciem szczeliny należy rozumieć obszar znajdujący się pomiędzy powierzchnią stygnięcia odlewu i powierzchnią nagrzewania formy.

W przypadku formy metalowej (kokili) szczelinę należy traktować jako dwuwarstwową, co pociąga za sobą sposób ujęcia wartości współczynnika wymiany ciepła. Musi on uwzględniać dwa rodzaje oporów cieplnych (rys.1):

- powłoki izolacyjnej naniesionej na powierzchnię kokili w celu zredukowania intensywności stygnięcia odlewu i nagrzewania formy,
- szczeliny gazowej - powstającej w wyniku procesu skurczu metalu, towarzyszącego (zawsze) procesowi krzepnięcia (krystalizacji) odlewu.

Schemat budowy szczeliny przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat oporów cieplnych dla szczeliny dwuwarstwowej

- 1 – szczelina gazowa powstająca w wyniku procesu skurczu metalu
- 2 – warstwa powłoki izolacyjnej

Zgodnie z definicją oporu cieplnego ścianki płaskiej, dla szczeliny gazowej wyniesie on:

$$S_{gaz} = \frac{X_{gaz}}{\lambda_{gaz}} \quad \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (7)$$

gdzie:

$$X_{gaz} = \frac{1}{2} X_1 E_j,$$

X_1 - połowa grubości odlewu [m],

E_j - bezwymiarowy skurcz liniowy,

λ_{gaz}, X_{gaz} - współczynnik przewodzenia ciepła [W/ (m K)] i grubość szczeliny gazowej [m].

Równanie wyrażające grubość szczeliny gazowej wynika z uśrednienia jej wartości w odniesieniu do momentu początku krzepnięcia (brak szczeliny gazowej) i w momencie końca krzepnięcia (maksymalna, końcowa grubość szczeliny jest wtedy równa $X_1 E_j$). Dla powłoki izolacyjnej, traktowanej jako ścianka płaska, opór cieplny wynosi:

$$S_p = \frac{X_p}{\lambda_p} \quad (8)$$

gdzie:

λ_p , X_p - współczynnik przewodzenia ciepła i grubość powłoki izolacyjnej.

Zgodnie z zasadami sumowania oporów cieplnych (np. dla ścianki płaskiej dwuwarstwowej), zastępczy współczynnik β jest odwrotnością tej sumy:

$$\beta = \frac{1}{S_{\text{gaz}} + S_p} = \frac{1}{\frac{X_{\text{gaz}}}{\lambda_{\text{gaz}}} + \frac{X_p}{\lambda_p}} \quad [\text{ W / m}^2\text{K}] \quad (9)$$

Wyznaczony współczynnik wymiany ciepła jest podstawowym parametrem opisującym przyjęte w modelu obliczeniowym warunki brzegowe.

5. Bilans cieplny i objętość metalu zakrzepłego w odlewie

Bilans cieplny zestawia ze sobą ciepło akumulowane w obszarze formy z ciepłem traconym przez odlew. Ciepło tracone przez odlew składa się z ciepła krzepnięcia i ciepła przegrzania odlewu, uwzględnionego w definicji efektywnego ciepła krzepnięcia odlewu.

Efektywne (sumaryczne) ciepło krzepnięcia L_{1p} , uwzględniające obie składowe procesy cieplnego, jest określone zależnością:

$$L_{1p} = L_1 + c'_1 \Delta T_p \quad [\text{ J / kg}] \quad (10)$$

gdzie:

L_1 - ciepło krzepnięcia metalu [J / kg],

c'_1 - ciepło właściwe metalu w stanie ciekłym [J / (kg K)],

$\Delta T_p = T_{\text{zal}} - T_{\text{kr}}$ - przegrzanie metalu [K],

T_{zal} - temperatura zalewania lub temperatura początkowa metalu w odlewie w momencie zapełnienia wnęki formy [°C lub K],

T_{kr} - temperatura krzepnięcia odlewu [°C lub K],

Zgodnie z powyższym ogólny bilans cieplny dla układu odlew- forma metalowa można zapisać w postaci:

$$m_{\text{kr}} L_1 + m_{\text{kr}} c'_1 \Delta T_p = v_{\text{kr}} \rho_1 L_{1p} = Q_{\text{ak}} \quad (11)$$

lub dla momentu zakończenia procesu krzepnięcia jako:

$$m_1 L_{1p} = V_1 \rho_1 L_{1p} = Q_{ak.3} \quad (12)$$

gdzie:

m_{kr} , v_{kr} - masa zakrzepłego metalu, objętość zakrzepła w odlewie,

ρ_1 - gęstość metalu odlewu [kg/m³],

m_1 - całkowita masa odlewu,

$Q_{ak.3}$ - ciepło akumulowane w formie w momencie zakrzepnięcia odlewu (τ_3).

Należy w tym miejscu (czujnie i inteligentnie!) zauważyć, że w przypadku braku strat ciepła z formy do „zewnątrznego” otoczenia ogólny bilans cieplny (11, 12) obdorzony jest „atrybutem uniwersalności”, czyli jest słuszny dla dowolnego materiału formy (inne są natomiast równania opisujące ciepło akumulacji w formie Q_{ak}).

Ciepło akumulowane wyznaczone z równania (6) dla wybranego zakresu czasowego obejmującego czas krzepnięcia odlewu pozwala na jednoznaczne określenie przyrostu objętości odlewu w funkcji czasu. Fizyczny sens uzyskanych wyników ograniczony jest do interwału czasowego zakończonego wartością czasu krzepnięcia, w którym objętość zakrzepła jest równa objętości odlewu oraz ciepło akumulowane $Q_{ak.3}$ jest równe dokładnie ogólnemu ciepłu krzepnięcia (iloczyn „ $m_1 L_{1p}$ ”, zgodnie z równaniem [12]).

6. Graficzna metoda wyznaczenia czasu krzepnięcia odlewu

Zgodnie z równaniem bilansu (11), wartość objętości metalu zakrzepłego w odlewie można wyrazić w postaci:

$$v_{kr} = \frac{Q_{ak}}{\rho_1 L_{1p}} \quad [m^3] \quad (13)$$

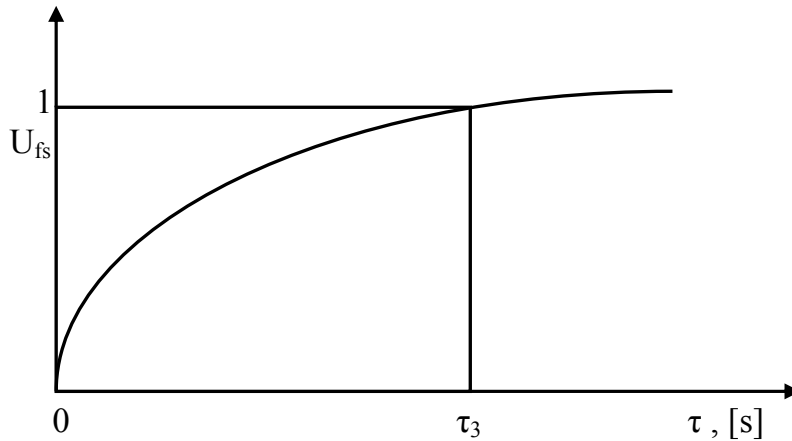
Z uwagi na złożoną postać matematyczną zależności opisującej ciepło Q_{ak} oraz fakt, że objętość zakrzepła jest funkcją 10. parametrów (L_1 , ρ_1 , c_1' , X_1 , b_2 , β , T_{zal} , T_{kr} , T_{2p} , τ), opracowano procedurę obliczeniową, pozwalającą na wyrażenie jej w funkcji czasu. Dla wyznaczenia czasu krzepnięcia odlewu opracowano metodę wykreślną, realizującą koncepcję graficznego rozwiązania zależności występujących w ogólnym bilansie cieplnym. Metodę tę wykorzystano w, dołączonym do instrukcji, arkuszu obliczeniowym, stanowiącym sprawozdanie z wykonanych badań doświadczalnych.

Istotnym parametrem algorytmu graficznego rozwiązania równań (11, 13) jest bezwymiarowy ułamek udziału fazy stałej (zakrzepłej), definiowany:

$$U_{fs} = \frac{v_{kr}}{V_1} \quad (14)$$

gdzie: V_1 – całkowita objętość odlewu.

Jak wynika z zależności definicyjnej (14) w momencie zakrzepnięcia odlewu udział fazy stałej przyjmuje wartość 1. Przykład zmienności udziału fazy stałej w odlewie, równoważnej bezwymiarowej objętości zakrzepłej, w funkcji czasu przedstawiono na rys. 2. Uzyskana krzywa - w interwale czasowym od zera do czasu τ_3 - może być traktowana jako graficzny obraz kinetyki krzepnięcia odlewu.



Rys. 2. Przykład opisu przebiegu procesu krzepnięcia za pomocą udziału fazy zakrzepłej (τ_3 – szukany czas krzepnięcia odlewu dla punktu w którym $v_{kr} = V_1$).

Punkt czasowy odpowiadający zakrzepnięciu całej objętości odlewu ($v_{kr} = V_1$ czyli $U_{fs} = 1$) jest szukany czas krzepnięcia odlewu w kokili grubościennej (materiałem formy jest żeliwo). Praktyczny przykład procedury wykreślnego wyznaczenia czasu krzepnięcia podano w postaci tabeli obliczeniowej w arkuszu sprawozdania.

7. Przykładowe pytania

1. Zdefiniować pojęcie warunków brzegowych 1. i 3. rodzaju [1, 2].
2. Model procesu krzepnięcia odlewu w kokili grubościennej [1, 3].
3. Podaj związek między przewodzeniem ciepła przez ściankę dwuwarstwową a koncepcją określenia zastępczego współczynnika wymiany ciepła w szczelinie [3]
4. Podać 5 parametrów od których zależy czas krzepnięcia odlewu [1, 3].
5. Ogólny bilans cieplny ujmujący objętość zakrzepłą w odlewie [1, 3]. Czy jest inny niż dla formy piaskowej ?
6. Procedura wykreślnego wyznaczania czasu krzepnięcia odlewu [3].
7. Definicje: ciepła krzepnięcia, współczynnika akumulacji, współczynnika wyrównywania temperatury, współczynnika wymiany ciepła , strumienia cieplnego, pojęcie półprzestrzeni w sensie cieplnym, pojęcie bilansu [1, 2, 3].

8. Literatura

1. W. Longa : Krzepnięcie odlewów. Wyd. Śląsk Katowice 1985 (s. 195 – 198)
2. Wykłady
3. Wykład dotyczący krzepnięcia odlewu w kokili (planowany w maju 2009).
4. Instrukcja nr 4

Na stronie 8 znajduje się poprawiony, aktualny arkusz obliczeniowy !!

w17 Ćwiczenie laboratoryjne nr 4 Imię NAZWISKO

IV ROK sekcja: MetNież.** Tech.F.** Żeliwo ** Wirtualiz ** Data ćw. 04. 2009

„Badanie krzepnięcia odlewu w kokili grubościennej”

$$X_1 = 0.018 \text{ m}; \quad E_j = 0,01.; \quad \lambda_{gaz} = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K});$$

$$X_{gaz} = 0,5 \cdot X_1 \cdot E_j = \dots\dots\dots \text{ m}; \quad X_p = 0.0002 \text{ m}; \quad \lambda_p = 0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K});$$

$$\beta = \left(X_p / \lambda_p + X_{gaz} / \lambda_{gaz} \right)^{-1} = \dots\dots\dots \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}); \quad L_1 = 490000 \text{ J}/\text{kg};$$

$$c_1' = 1290 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}); \quad \rho_1 = 2600 \text{ kg}/\text{m}^3; \quad T_{kr} = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C}; \quad T_{1p} = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\Delta T_p = \dots\dots\dots \text{ K}; \quad L_{1p} = L_1 + c_1' \Delta T_p = \dots\dots\dots \text{ J}/\text{kg};$$

$$\lambda_2 = (45 \pm 5) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})^{**}; \quad \rho_2 = 7200 \text{ kg}/\text{m}^3; \quad c_2 = 650 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K});$$

$$b_2 = \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2} = \dots\dots\dots \text{ W} \cdot \text{s}^{-1/2}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}); \quad T_{2p} = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C};$$

$$g_{kr} = T_{kr} - T_{2p} = \dots\dots\dots \text{ K}; \quad a_F = 0.25 \text{ m}; \quad b_F = 0.2 \text{ m};$$

$$F = 2 \cdot a_F \cdot b_F = \dots\dots\dots \text{ m}^2; \quad V_{odl} = F \cdot X_1 = \dots\dots\dots \text{ m}^3; \quad \tau_{3.eks.} = \dots\dots\dots \text{ s (110-150!)}$$

τ [s]	K_1 [J]	z	K_2	K_3	K_4	Q_{ak} [J]	v_{kr} [m ³]	$U_{fs} = v_{kr}/V_{odl}$
10								
100	.xxx							
*	.xxx							
*	.xxx							
*	.xxx							
*	.xxx							
*	.xxx							
*								1,00

* wybrać momenty czasowe

** - wybrać indywidualnie !! *** Liczba osób z tymi wynikami = ...

$$K_1 = b_2^2 g_{kr} F / \beta = \dots\dots\dots * 10^3 \quad U_{fs}$$

$$z = \beta \cdot b_2^{-1} \cdot \sqrt{\tau};$$

$$K_2 = 2 \cdot z / \sqrt{\pi} - 1;$$

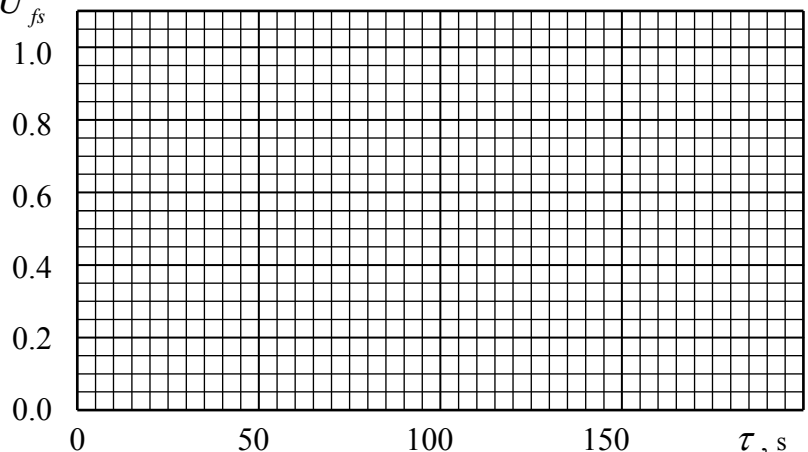
$$K_3 = \exp(z^2);$$

$$K_4 = \text{erfc}(z);$$

$$Q_{ak} = K_1 (K_2 + K_3 \cdot K_4), \text{ [J]};$$

$$v_{kr} = Q_{ak} / (\rho_1 \cdot L_{1p}), \text{ [m}^3\text{]}$$

$$\tau_{3.obl} = \text{___} \text{ s}$$



Uwaga do obliczeń K_4 : dopełniająca funkcja błędów: $\text{erfc}(u) = 1 - \text{erf}(u)$, np.. $\text{erfc}(0,95) = 0,179$

Na odwrócić: bilans do obliczenia objętości zakrzepłej, wpływ λ_p, T_{2p} i b_2 na τ_3 , wnioski(14dni)

Tabela wartości funkcji błędów Gaussa erf (u) [u = x/(2√a·τ)]

u	erf u	u	erf u	u	erf u	u	erf u
0.00	0.000 00	0.50	0.520 50	1.00	0.842 70	1.50	0.966 11
0.01	0.011 28	0.51	0.529 24	1.01	0.846 81	1.51	0.967 28
0.02	0.022 56	0.52	0.537 90	1.02	0.850 84	1.52	0.968 41
0.03	0.033 84	0.53	0.546 46	1.03	0.854 78	1.53	0.969 52
0.04	0.045 11	0.54	0.554 94	1.04	0.858 65	1.54	0.970 59
0.05	0.056 37	0.55	0.563 32	1.05	0.862 44	1.55	0.971 62
0.06	0.067 62	0.56	0.571 62	1.06	0.866 14	1.56	0.972 63
0.07	0.078 86	0.57	0.579 82	1.07	0.869 77	1.57	0.973 60
0.08	0.090 08	0.58	0.587 92	1.08	0.873 33	1.58	0.974 55
0.09	0.101 28	0.59	0.595 94	1.09	0.876 80	1.59	0.975 46
0.10	0.112 46	0.60	0.603 86	1.10	0.880 21	1.60	0.976 35
0.11	0.123 62	0.61	0.611 68	1.11	0.883 53	1.61	0.977 21
0.12	0.134 76	0.62	0.619 41	1.12	0.886 97	1.62	0.978 04
0.13	0.145 87	0.63	0.627 05	1.13	0.889 97	1.63	0.978 84
0.14	0.156 95	0.64	0.634 59	1.14	0.893 08	1.64	0.979 62
0.15	0.168 00	0.65	0.642 03	1.15	0.896 12	1.65	0.980 38
0.16	0.179 01	0.66	0.649 38	1.16	0.889 10	1.66	0.981 10
0.17	0.189 99	0.67	0.656 63	1.17	0.902 00	1.67	0.981 81
0.18	0.200 94	0.68	0.663 78	1.18	0.904 84	1.68	0.982 49
0.19	0.211 84	0.69	0.670 84	1.19	0.907 61	1.69	0.983 15
0.20	0.222 70	0.70	0.677 80	1.20	0.910 31	1.70	0.983 79
0.21	0.233 52	0.71	0.684 67	1.21	0.912 96	1.71	0.984 41
0.22	0.244 30	0.72	0.691 43	1.22	0.915 53	1.72	0.985 00
0.23	0.255 02	0.73	0.698 10	1.23	0.918 05	1.73	0.985 58
0.24	0.265 70	0.74	0.704 68	1.24	0.920 51	1.74	0.986 13
0.25	0.276 33	0.75	0.711 16	1.25	0.922 90	1.75	0.986 67
0.26	0.286 90	0.76	0.717 54	1.26	0.925 24	1.76	0.987 19
0.27	0.297 42	0.77	0.723 82	1.27	0.927 51	1.77	0.987 69
0.28	0.307 68	0.78	0.730 01	1.28	0.929 73	1.78	0.988 17
0.29	0.318 28	0.79	0.736 10	1.29	0.931 90	1.79	0.988 64
0.30	0.328 63	0.80	0.742 10	1.30	0.934 01	1.80	0.989 09
0.31	0.338 91	0.81	0.748 00	1.31	0.936 06	1.81	0.989 52
0.32	0.349 13	0.82	0.753 81	1.32	0.938 07	1.82	0.989 94
0.33	0.35928	0.83	0.759 52	1.33	0.940 02	1.83	0.990 35
0.34	0.369 36	0.84	0.765 14	1.34	0.941 91	1.84	0.990 74
0.35	0.379 38	0.85	0.770 67	1.35	0.943 76	1.85	0.991 11
0.36	0.38933	0.86	0.776 10	1.36	0.945 56	1.86	0.991 47
0.37	0.399 21	0.87	0.781 44	1.37	0.947 31	1.87	0.991 82
0.38	0.409 01	0.88	0.786 69	1.38	0.949 02	1.88	0.992 16
0.39	0.418 74	0.89	0.791 84	1.39	0.950 67	1.89	0.992 48
0.40	0.428 39	0.90	0.796 91	1.40	0.952 29	1.90	0.992 79
0.41	0.437 99	0.91	0.801 88	1.41	0.953 85	1.91	0.993 09
0.42	0.447 47	0.92	0.806 77	1.42	0.955 38	1.92	0.993 38
0.43	0.456 89	0.93	0.811 56	1.43	0.956 86	1.93	0.993 66
0.44	0.466 23	0.94	0.816 27	1.44	0.958 30	1.94	0.993 92
0.45	0.475 48	0.95	0.820 89	1.45	0.959 70	1.95	0.994 18
0.46	0.484 66	0.96	0.825 42	1.46	0.961 05	1.96	0.994 43
0.47	0.49375	0.97	0.829 87	1.47	0.962 37	1.97	0.994 66
0.48	0.502 75	0.98	0.834 23	1.48	0.963 65	1.98	0.994 89
0.49	0.511 67	0.99	0.838 51	1.49	0.964 90	1.99	0.995 11

Uwaga nr 2: w dniu 22 kwietnia 2009 wartość eksperymentalnego czasu krzepnięcia odlewu wyniosła

$$\tau_{3.eks.} = 132 \text{ s}$$

Aktualna (od 21.05.2009) wersja instrukcji ma nr 19 (w19).

Uzupełniono również arkusz obliczeniowy dla przeciwdziałania pseudonaukowym metodom interpretacji dopełniającej funkcji błędów Gaussa, tj. funkcji $\operatorname{erfc}(z)$!