

Bohdan Mochnacki
Józef Suchy

PERSPEKTYWY WYKORZYSTANIA METOD NUMERYCZNYCH W PROJEKTOWANIU I STEROWANIU TECHNOLOGIAMI ODLEWNICZYMI W ŚWIETLE PRAC PREZENTOWANYCH NA 50. INT. FOUNDRY CONGRESS (1983)

Jedną z imprez towarzyszących obradom 50 Międzynarodowego Kongresu CIATF w Kairze była dyskusja okrągłego stołu na temat matematycznego modelowania procesów odlewniczych. Równocześnie uczestnicy Kongresu otrzymali wydaną przez Instytut Technologiczny w Aachen i Duński Uniwersytet Techniczny książkę pt. "Solidification Processes: Computer Simulation and Modelling, Workshop", stanowiącą zbiór artykułów dotyczących zastosowania metod komputerowych w odlewnictwie.

Artykuły zebrane w Workshop prezentują najnowsze osiągnięcia zachodnich instytutów badawczych i wyższych uczelni w zakresie zastosowania symulacji numerycznej do obliczeń (przede wszystkim cieplnych) procesów krzepnięcia i stygnięcia metali. W publikacjach położono szczególny nacisk nie na problemy teorii wymiany ciepła i masy w procesie krzepnięcia, lecz na prezentację otrzymanych wyników, co wiąże się z charakterem tego typu opracowań, które kieruje się do odbiorcy z przemysłu, zainteresowanego efektami utylitarnymi i ich przydatnością w działalności swojego przedsiębiorstwa. Niemniej jednak problemy poruszane w "Solidification Processes" mogą być również interesujące dla specjalistów w tym zakresie, pokazują one m.in. główne kierunki badań i tendencje rozwojowe teorii cieplnej procesów odlewniczych.

Ponieważ Workshop kongresowy jest w kraju trudno dostępny, zgodnie więc z sugestią redaktora Zeszytu prof. dr. inż. Wacława Sakwy prezentujemy na łamach "Krzepnięcia Metali i Stopów" najważniejsze tezy prac opublikowanych w w.w. materiałach, przy czym nie ograniczamy się jedynie do streszczeń kolejnych artykułów. Omówienia prac uzupełniamy własnymi uwagami i komentarzami oraz przedstawiamy (w zarysie) wyniki uzyskane w kraju w zakresie problemów poruszanych w "Solidification Processes".

Peter R. Sahm: Applications - Properties - Microstructure - Solidification Technologies: Challenge for Computer Simulation and Modelling Foundry Processes (Aachen Inst. of Technology, Germany).

Artykuł P.R. Sahma stanowi wprowadzenie czytelnika w problematykę szeroko rozumianych zastosowań metod komputerowych we współczesnym odlewnictwie. Zagadnienie krzepnięcia i związanych z nim mikrostruktur i właściwości odlewu były i są tematem licznych badań teoretycznych i doświadczalnych prowadzonych przez specjalistów w różnych ośrodkach naukowych i przez inżynierów praktyków. Niektóre nawet proste zasady (jak np. wzory Chworinova) są nadal stosowane do oceny przebiegu procesu krzepnięcia odlewu. Biorąc jednak pod uwagę możliwości współczesnych maszyn cyfrowych, badania typowego dla problemów odlewniczych łańcucha (ścieżki):

zastosowanie wyrobu → żądane właściwości → mikrostruktura →
 technologia wytwarzania (odlewnia) wyrobu

- mogą być obecnie przeprowadzone dokładniej, szybciej i lepiej, tzn. projektowana technologia będzie bliższa technologii optymalnej dla rozpatrywanego wyrobu.

Problemy wykorzystania maszyn cyfrowych w odlewnictwie wiążą się nie tylko z modelowaniem matematycznym procesów fizycznych. Współczesna odlewnia jest wytwórnią o złożonej strukturze organizacyjnej i technicznej, stąd też istotne znaczenie dla jej pracy ma dobrze zorganizowany "bank informacji" technicznych, organizacyjnych, a nawet perso-

nalnych, czyli te działy metod komputerowych, które związane są z przetwarzaniem danych.

W dalszej części artykułu autor podaje kilka powszechnie znanych i dość prostych, ale jak wskazuje praktyka efektywnych wzorów do obliczeń czasu krzepnięcia, lokalnego czasu krzepnięcia, sposobów uwzględnienia faktu krzepnięcia stopu w interwale temperatury itp. wraz z wykresami ilustrującymi wyniki eksperymentów i obliczeń teoretycznych. Należy sądzić, że ta część pracy, która nie ma wiele wspólnego z zastosowaniem metod komputerowych w odlewnictwie, miała być w zamyśle Autora krótkim przeglądem modeli matematycznych procesu krzepnięcia, gdyż cytowane przez P.R. Sahma zależności wynikają z ogólnych rozwiązań dla pewnych modeli procesu, np. według Stefana, Schwartza, Scheila i in.

Preben H. Hansen: *Mathematical and Numerical Modelling in Casting Process Simulation*. (Techn. Univ. of Denmark)

Artykuł ma charakter przeglądowny i łącznie z artykułem P.R. Sahma stanowi w jakimś sensie wprowadzenie do Workshop. Początki zastosowania metod komputerowych w odlewnictwie przypisuje Autor K. Fursundowi (1962). Pogląd ten jest dość subiektywny, gdyż już w latach pięćdziesiątych pojawiły się prace Schniewinda i Eyresa dotyczące modelowania numerycznego procesu krzepnięcia obiektów o prostej geometrii.

Aby podkreślić rolę i znaczenie metod numerycznych w odlewnictwie Autor cytuje bibliografię sporządzoną przez W.C. Eriksona (1980), w której zebrano 138 pozycji opublikowanych w roku 1978, a należy sądzić, że bibliografia ta nie ujmuje wszystkich prac w tym zakresie, w szczególności z krajów KDL i ZSRR.

W rozdziałach II, III Autor dokonuje przeglądu niektórych modeli analitycznych, opisujących zjawiska związane z procesem krzepnięcia traktowanym zarówno jako proces makroskopowy, jak i mikroskopowy.

W szczególności w rozdz. II P.N. Hansen podaje krótki słowny opis procesu zapełniania formy ciekłym metalem, podkreślając przy tym,

że rozwiązanie analityczne układu równań opisujących proces (równanie energii, równanie N-S, równanie ciągłości) jest praktycznie dla przypadków bliskich warunkom rzeczywistym niemożliwe. Równocześnie cytuje kilka prac, w których przedstawiono programy zastępujące "ręczne obliczenia" (hand calculations), w takich przypadkach wykonywane i bazujące na bardzo prostych modelach matematycznych, oraz jedną z prac R.A. Stoehra i W.S. Hwang'a (1983), w której podano rozwiązanie analityczne przy założeniu, że ciekły metal ma stałą temperaturę i nie krzepnie w procesie zalewania.

Rozdział III stanowi przegląd kilku problemów teoretycznych związanych z procesem przemiany fazowej. Autor bazuje głównie na książce Flemingsa (1974), podaje za nim mechanizm krzepnięcia, jedno z rozwiązań analitycznych bazujące na funkcjach błędu, przy czym przykład ten jest dobrany niezbyt fortunnie, gdyż dużo ciekawsze dla czytelnika mogą być rozwiązania ujmujące dokładniej proces krzepnięcia, a również bazujące na metodzie Schwartza. W zakresie problemów krzepnięcia w interwale temperatury i segregacji pierwiastków stopowych Autor podaje znane powszechnie modele Scheila i model nazywany modelem reguły dźwigni.

Problemom zastosowania metod modelowania numerycznego procesów odlewniczych (w szczególności procesów cieplnych) poświęca Autor rozdział III swojego artykułu.

Uzyskanie pełnej informacji o przebiegu cieplnym procesu wymaga budowy skomplikowanych modeli matematycznych, uwzględniających m.in. złożoną geometrię odlewu (Autor odwołuje się tu do pracy J.T. Berrego i R.D. Pehlkego, które przedstawimy w dalszej części niniejszego omówienia), nieliniowość opisu matematycznego (por. P.N. Hansen, j.w.), wybór modelu, który uwarunkowany jest możliwościami maszyny cyfrowej, którą dysponuje rozważany zakład.

Na wybór metody obliczeń mają również wpływ pewne elementy czysto ekonomiczne, np. rozmiar produkcji, koszt jednostkowy wyrobu itd. W rozdziale tym P.R. Sahm stwierdza (z poglądem tym zgadzają się autorzy niniejszego omówienia), że potrzeby przeciętnej odlewni w tym zakresie pokryje w pełni maszyna cyfrowa z grupy nowoczesnych

minikomputerów o pamięci operacyjnej rzędu 64 k z drukarką i plotterem, ewentualnie z pamięcią dyskową. Duże maszyny cyfrowe, biorąc pod uwagę ich wysoki koszt, skomplikowany serwis, trudności w obsłudze i programowaniu, nie spełniają dobrze swoich zadań w tego typu zakładach przemysłowych, jakimi są odlewnie.

W końcowej części swojego artykułu Autor wyraża pogląd, że jedyny możliwy "scenariusz" dalszego rozwoju nauk odlewniczych, wiąże się z powszechnym stosowaniem w praktyce technik komputerowych zarówno dla projektowania, jak i optymalizacji oraz sterowania technologią wytwarzania odlewów.

Wydaje się, że również w warunkach polskiego przemysłu należy dążyć do rozpowszechnienia nowoczesnych metod projektowania technologii odlewniczych. Nawet w obecnych dość trudnych dla realizacji tego typu zamierzeń warunkach, koszt zakupu i szansa nabycia minikomputera pozostają w możliwościach przeciętnego zakładu, opanowanie zaś sposobów realizacji złożonych modeli matematycznych jest w zasięgu potencjalnych możliwości każdego inżyniera konstruktora lub technologa. Autorzy niniejszego omówienia Workshop 1983 uczestniczą w ramach MR.20 w badaniach podstawowych dotyczących komputerowych metod projektowania technologii odlewniczych, a jednocześnie brali udział w licznych pracach tego typu na potrzeby przemysłu, organizowali również w ramach STOP, szkolenia dla inżynierów w tym zakresie. Zebrane przez nich doświadczenia potwierdzają w pełni podstawowe tezy artykułu P.R. Sahma o znaczeniu komputeryzacji w rozwoju nauk odlewniczych. Bardziej rozbudowany model dźwigni przedstawił Samojułowicz (1977), model zaś Scheila rozwinął Borisov (1961). Rozdział IV zatytułowany "Komputerowe modelowanie krzepnięcia odlewu" zawiera informację o metodach numerycznych stosowanych do obliczeń procesów krzepnięcia odlewów. Autor wymienia tu metodę różnic skończonych, metodę elementów skończonych oraz metodę elementów brzegowych wraz z przykładami publikacji i prac, w których użyto wymienionych metod. Autor wyraźnie preferuje te algorytmy, w których rozważa się rozkład entalpii w objętości odlewu. W pracach wykonywanych w naszym zespole stosujemy zarówno ujęcie entalpowe (np. obliczenia krzepnięcia metodą elementów skończonych, metoda-

mi kolokacyjnymi, wykorzystanie w algorytmach metody przemiennej fazy itp.), jak również ujęcie temperaturowe. Z poglądem Autora, który twierdzi, że metody temperaturowe szczególnie w odniesieniu do zadań ze strefą przejściową są niezbyt dogodne, a to dlatego, że wprowadzenie do obliczeń zastępczej pojemności cieplnej w strefie przejściowej nie ma interpretacji fizycznej nie można się zgodzić, gdyż zastępcza pojemność cieplna wynika z rozważań dotyczących bilansu energii dla elementu wybranego ze strefy przejściowej, bazuje więc na fundamentalnych prawach termodynamiki. Równocześnie P.N. Hansen nie ustosunkowuje się do trudności związanych z numeryczną realizacją obliczeń entalpowych, która w przypadku metalu krzepnącego w stałej temperaturze charakteryzuje się skokową zmianą w pobliżu izotermy granicznej i funkcja $H(T)$ wymaga specjalnego wygładzenia (Budak, 1965) lub zastosowania innych algorytmów opisanych w literaturze.

W zakończeniu artykułu Autor prognozuje podobnie jak P.N. Sahn, że w przyszłości metody komputerowe będą podstawowym narzędziem w projektowaniu technologii odlewniczych.

John T. Berry and Robert D. Pehlke: *Mathematical Treatment of Numerical Solutions and Modeling in Solidification Simulation* (Georgia Inst. of Technology).

W artykule przedstawiono kilka programów numerycznych symulujących proces krzepnięcia odlewu o złożonym kształcie.

W części pierwszej omówiono wyniki symulacji numerycznej osiowo-symetrycznego odlewu aluminiowego w formie piaskowej. Odlew ten składał się z części głównej, stanowiącej złożenie współosiowych walców o różnych średnicach oraz nadlewu. Zadanie traktowano jako osiowo-symetryczne, co problem przestrzenny sprowadza do zadania dwuwymiarowego. Autorzy nie wyjaśnili, w jaki sposób uwzględniono asymetrię wynikającą z występowania nadlewu i układu wlewowego. Do obliczeń numerycznych zastosowano metodę różnic skończonych, a w szczególności pewną jej odmianę (metoda kierunków naprzemiennych). Istotnym elementem tej części pracy jest weryfikacja otrzymanych wyników obliczeń nu-

merycznych ze zmierzonymi na odlewie rzeczywistym krzywymi stygnięcia w ośmiu wybranych punktach odlewu. Autorzy podkreślają dużą dokładność obliczeń numerycznych. Ograniczając się do prac wykonanych w ostatnim okresie w ramach MR 20 oraz prac naukowo-badawczych realizowanych w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, należy podkreślić, że podobne wyniki (w odniesieniu do osiowo-symetrycznych odlewów misy i stożka wielkiego pieca) otrzymano w pracach wykonywanych dla Huty "Dzierżyński" i huty "Zygmunt", równocześnie wyniki te prezentowano na 46 kongresie CIATF w Budapeszcie i opublikowano w Przeglądzie Odlewnictwa w roku 1979. W omawianych pracach użyto również metody różnic skończonych, przy czym uwzględniono w pełni złożoność kształtów odlewów, nieliniowość warunków brzegowych i parametrów cieplnych materiałów odlewu i formy.

W drugiej części artykułu Autorzy przedstawiają wyniki symulacji numerycznej krzepnięcia odlewu, będącego prawdopodobnie wieńcem koła i zasilanego walcowym nadlewem. Dla różnych warunków geometrycznych Autorzy wyznaczają kształt jamy skurczowej w nadlewie, przy czym zgodność otrzymanego kształtu jamy z rzeczywistym jej kształtem jest dobra. Pewne różnice wynikają zdaniem Autorów z trudności uwzględnienia wpływu zasypki egzotermicznej na warunek brzegowy w górnej części nadlewu.

Problem wyznaczania kinetyki powstawania i końcowego kształtu jamy skurczowej jest tematem dwóch zadań wykonywanych w ramach MR 20, przy czym algorytm obliczeń jamy skurczowej w objętości wlewka ciężkiego był przedmiotem naszego referatu na 50. kongresie CIATF w Karlsruhe. Równocześnie można przypomnieć artykuł opublikowany w Archiwum Hutnictwa 3/71 przez Szarguta i Mochnackiego.

Należy sądzić, że metoda obliczeń kształtu jamy prezentowana w Workshop jest bardzo podobna do metody stosowanej w naszych opracowaniach. Szczegółowe porównanie obu metod nie jest możliwe, gdyż omawiany artykuł nie dostarcza takich informacji.

Interesującym fragmentem pracy jest część dotycząca oceny wielkości nadlewu dla rozważanego odlewu. Okazało się, że obliczenia komputerowe dla konkretnego odlewu pozwoliły na optymalizację kształtu nad-

lewu i objętości, przy czym proponowany nadlew wymaga tylko 68% ilości metalu w porównaniu do obliczeń metodami klasycznymi. Autorzy uważają więc (i słusznie), że metody komputerowe prowadzą do określenia optymalnych technologicznie i ekonomicznie warunków wytwarzania odlewów.

Trzecia część artykułu zawiera omówienie procedur numerycznych, jakimi dysponują Autorzy publikacji. Procedury te wymienione są tylko z nazwy i bazują bądź na metodzie różnic skończonych, bądź na metodzie elementów skończonych. W zależności od stopnia komplikacji uwzględnia się nieliniowości w warunkach brzegowych lub parametrach materiałowych, problemy warunków brzegowych na styku odlewu i formy, mniej lub bardziej złożone warunki geometryczne. Koszt jednej symulacji procesu w zależności od stopnia komplikacji zadania waha się w granicach od 100 do 1000 dolarów, co Autorzy uważają za sumę niewielką w porównaniu z korzyściami ekonomicznymi wynikającymi z optymalizacji procesu. Z tekstu omawianego rozdziału wynika, że optymalizacja ta uzyskiwana jest metodą rozwiązania kolejnych wariantów technologicznych, różniących się między sobą warunkami geometrycznymi (np. kształt nadlewu, rozmieszczenie ochładzalników itp.), warunkami fizycznymi (temperatura zalewania, rodzaje mas formierskich itp.). Podobne optymalizacje stosujemy w naszych pracach z tym, że w okresie ostatnich kilku lat pracujemy nad metodami optymalizacji technologii odlewniczych poprzez rozwiązanie tzw. zadań odwrotnych, co jest problemem dużo trudniejszym, ale bardziej efektywnym.

W. Richter: Simplified 3-dimensional calculation of thermal fields in rotationally symmetric castings (Aachen Inst. of Techn.-Germany)

Celem artykułu było zilustrowanie funkcjonowania komputerowego modelu dla trójwymiarowego symetrycznego odlewu (Autor ma na myśli zadania osiowo-symetryczne). Program obliczeń numerycznych bazuje na metodzie elementów skończonych i został opracowany w Instytucie Odlewnictwa w Aachen.

W artykule podaje się opis matematyczny wymiany ciepła w obszarze

jednorodnym w postaci równania przewodnictwa cieplnego i warunków brzegowych I lub III rodzaju oraz warunku początkowego. Autor podaje postać funkcjonału, którego minimum odpowiada rozwiązaniu problemu brzegowo-początkowego. Szczegółowe równania rozpisano dla układu współrzędnych walcowych. Opis teoretyczny metody oraz sposób jego realizacji numerycznej nie odbiega od rozważań przedstawionych w pracy doktorskiej K. Mazura i opublikowanej między innymi w Z.N. Pol. Śl. Energetyka. Obiekt osiowo-symetryczny (wieniec koła zębatego) pokryto elementami skończonymi trójkątnymi i podług znanego algorytmu wyznaczono zmienne w czasie pole temperatury w węzłach obszaru. Przykład podany przez Autora dotyczy tylko stygnięcia odlewu i w związku z tym jest mało przydatny do celów praktycznych. Być może, że za pomocą tego samego programu można również modelować proces krzepnięcia, z tym że równania podane przez Autora dotyczą tylko obiektów jednorodnych i oprócz jednego zdania we wstępie nic nie mówi się o obliczeniach technologii odlewniczych.

Porównując powyższy artykuł z pracami publikowanymi w kraju należy stwierdzić, że badania w zakresie zastosowania metody elementów skończonych do obliczeń problemów krzepnięcia są u nas bardziej rozwinięte niż wyniki prezentowane przez W. Richtera.

Biorąc pod uwagę ogromny wzrost kosztów obliczeń problemów nieliniowych w stosunku do analogicznych zadań liniowych, należy zwrócić uwagę na możliwość połączenia metody elementów skończonych z metodą przemiennej fazy (por. sprawozd. 20.04.03. MR 20). Metoda przemiennej fazy pozwala usunąć z modelu matematycznego trudny w realizacji numerycznej warunek Stefana, kosztem dwukrotnego rozwiązania zadania brzegowo-początkowego dla formalnie ujednorodnionego obszaru odlewu.

Jean Luc Meyer, Francis Durand: Interactive effects of heat and fluid flows during solidification of ingots (Grenoble's Polytechnic Institute).

Artykuł dotyczy problemów przepływu ciepła i masy w ciekłej części krzepnącego odlewu. We wstępie podkreślono znaczenie procesów konwekcyjnych dla przebiegu procesów cieplnych w ciekłym metalu zapeł-

niającym wnękę formy. Podkreślono równocześnie niewielką liczbę informacji, jakimi dysponują odlewnicy przy projektowaniu układu zasilania oraz przy analizie ruchu ciekłego metalu w objętości formy. Badania Autorów w tym zakresie mają charakter doświadczalno-teoretyczny. Zbudowano stanowisko pomiarowe, składające się z prostopadłościennej formy metalowej o wymiarach 400 x 200 x 70, którą wypełniono ciekłym stopem aluminiowym z dodatkiem 2% miedzi. Naturalną i wymuszoną konwekcję (a ściślej ruch ciekłego metalu we wlewnicy) uzyskiwano poprzez umieszczenie jej w polu indukcyjnym. Otrzymane wyniki jakościowe i ilościowe były bazą do konstrukcji modelu matematycznego ruchu ciekłego metalu, przy czym Autorzy nie podają szczegółów metody obliczeń, z wyjątkiem stwierdzenia, że była to metoda numeryczna, zaś obiekt traktowano jako dwuwymiarowy. Bardzo interesujące dla czytelnika są rysunki ilustrujące zaburzenia pola temperatury, które generuje się w układzie, jeśli w obliczeniach pominąć wpływ konwekcji w stosunku do rozkładów temperatur dla konwekcji swobodnej i konwekcji wymuszonej.

Dla osób zainteresowanych problemami modelowania numerycznego procesów krzepnięcia i stygnięcia metalu w formie ważną może być informacja, że nawet w przypadku konwekcji naturalnej pole temperatury w ciekłej części odlewu charakteryzują bardzo małe gradienty, a nawet można przyjąć je jako stałe. Jest to wynikiem mieszania ciekłego metalu w procesie zalewania i pierwszych etapach stygnięcia po napełnieniu wnęki formy.

Victor de L. Davies: Computed feeding distances. (University of Trondheim - Norway).

Problemy zasilania odlewów i związane z nimi oceny położenia jam skurczowych, porowatości itp. w objętości odlewu są bardzo istotne dla optymalnego zaprojektowania technologii odlewniczych. We wstępie Autor podkreśla, że dane cytowane w literaturze i bazujące na materiale empirycznym cechuje duży rozrzut wyników spowodowany prawdopodobnie różnymi warunkami eksperymentów, mających rozstrzygnąć o parametrach zasilania.

W pracy Autor zajmuje się metodą numeryczną obliczeń zasilania grawitacyjnego odlewów stalowych oraz odlewów wykonanych ze stopów aluminiowych w kształcie walca z nadlewem i wytwarzanych w masach formierskich z dodatkowym ochładzalukiem zewnętrznym przy dolnej powierzchni odlewu. Rozwiązanie uzyskano metodą różnic skończonych w postaci jawnej dla obiektów osiowo-symetrycznych. Autor przyjął pewne kryterium określające graniczny udział ciała stałego w elementach różnicowych, przy których mogą być one jeszcze zasilone, wprowadził równocześnie pewną poprawkę związaną z zasilaniem kapilarowym i określił dla różnych materiałów odległość zasilania. W swojej istocie praca jest bardzo podobna do pracy wykonywanej w latach 1976-1978 jako zadanie 20.04.06 problemu MR 20, przy czym wydaje się, że model prezentowany i zweryfikowany numerycznie w ramach w.w. zadania był bardziej precyzyjny, między innymi uwzględniono wynikające z praw filtracji opory przepływu ciekłego metalu przez generującą się w odlewie strefę przejściową. Również należy tu wymienić prace wykonywane w AGH w Krakowie, a dotyczące problemu zasilania stalowego wlewka.

Nahed El-Mahallawy: Simulation and control of gas turbine blade solidification (Ain Shams University Cairo)

W pracy tej omówiono możliwości analizy procesu krzepnięcia kierunkowego w celu określenia optymalnych warunków wzrostu, zapewniających żadaną strukturę i dużą wydajność produkcji. Skoncentrowano się na odlewach łopatek turbin gazowych, wykonywanych z tzw. superstopów. Zmieniając warunki stygnięcia obserwowano przebieg procesu krzepnięcia na modelu matematycznym przepływu ciepła w układzie. Zastosowano szereg uproszczeń modelowanego układu, a mianowicie sprowadzono go do osiowo-symetrycznego i założono warunki brzegowe pierwszego rodzaju, jedynie na powierzchni kokila-odlew zastosowano warunki III rodzaju. Rozwiązania poszukiwano najprostszą z dostępnych metod numerycznych - metodą różnic skończonych, przy czym założona siatka zmieniła nieco geometrię układu (już i tak uproszczoną).

Wprawdzie w tekście pracy zwrócono uwagę na rolę kryterium sta-

bilności frontu krystalizacji (ilorazu gradientu temperatury przed frontem i szybkości krystalizacji), jednak wyniki obliczeń dostarczają niewiele informacji poszerzających istniejące dane na ten temat. Z obliczeń wynika, że zwłaszcza w początkowej fazie krystalizacji, jej prędkość różni się od szybkości wyciągania.

Niewątpliwie w procesach krystalizacji kierunkowej nie można pominąć procesów dyfuzyjnych zachodzących w objętości odlewu. Jak wskazano w licznych pracach zjawisko segregacji składników stopowych może znacznie zmienić przebieg procesu krzepnięcia, a zwłaszcza jego szybkość (np. przez spowodowanie przechłodzenia stężeniowego na froncie; por. prace J. Suchego - Zeszyty Naukowe Politechniki Śl. Mechanika 76 wydane w 1983 r. oraz Solidification technology in the foundry and cast-house, wydaną przez Adlard and Son Ltd. w 1983).

Również, jak to wynika np. z prac J. Głowni (Metalurgia i odlewnictwo, 87, 1981) istotnym elementem morfologii frontu krystalizacji jest stopień segregacji pierwiastka w osnowie i jego oddziaływanie na mechanizm przyłączania atomów w procesie krystalizacji. Te związki między procesami krzepnięcia i krystalizacji zostały w omawianej pracy całkowicie pominięte. Przyjęta metoda rozwiązania modelu znacznie utrudniłaby uwzględnienie tych, bardzo istotnych nieliniowości. Również pewien niedosyt budzi zawarte w pracy stwierdzenie o zgodności przedstawionego modelu z wynikami eksperymentu, nie poparte żadnymi szczegółami.

F. Hediger: Unidirectional solidification of superalloys: Numerical simulation and process control (Aachen Institute of Technology)

Od roku 1980 w Instytucie Odlewnictwa w Aachen prowadzone są badania procesów kierunkowego krzepnięcia odlewów. Są to badania doświadczalne na piecu próżniowym, zainstalowanym w tym Instytucie oraz próby modelowania numerycznego i symulacji krzepnięcia kierunkowego. Badania te prowadzono dla superstopów w formach ceramicznych. Dzięki zamontowaniu 7 termoelementów w obszarze odlewu oraz zbierania innych danych (pole temperatury w komorze pieca, szybkość wyciągania itd.) za pomocą komputera podłączonego on-line do układu uzyskano liczne dane na temat kinetyki krzepnięcia badanego odlewu.

Szczegółową uwagę zwrócono na określenie gradientów temperatury w pobliżu frontu krystalizacji, co pozwoliło wyznaczyć, na podstawie kryterium stabilności frontu, maksymalną szybkość wyciągania, uznawaną tutaj za równą prędkości krystalizacji.

Obok badań doświadczalnych prowadzono też prace nad zamodelowaniem numerycznym omawianego procesu. Wykorzystywano tutaj metodę elementu skończonego (odpowiedni algorytm w bibliotece instytutu w Aachen nosi nazwę CASTS). Uwzględniono cztery podobszary układu: odlew, formę, miedzianą podstawę oraz otoczenie i zastosowano zmienne z temperaturą parametry termofizyczne podobszarów. Tak jak w poprzedniej pracy, również tutaj uproszczono obiekt do osiowo-symetrycznego.

Mówi się w pracy o porównywaniu wyników obliczeń z danymi doświadczalnymi, bez podawania konkretnych przykładów, przy czym celem jest uzyskanie możliwości sprzężenia komputera symulującego proces z układem pomiarowym pieca.

Tak bogata baza badawcza pozwoliłaby na zastosowanie modeli sprzęgających obustronnie zjawiska transportu ciepła w układzie i kinetykę krzepnięcia z innymi zjawiskami wówczas zachodzącymi. Należy tu zwłaszcza podkreślić możliwość uwzględnienia procesów dyfuzyjnych, mieszania ciekłego stopu, a być może i zjawisk mechanicznych. Prace takie wykonywane są w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej (Krzepnięcie metali i stopów t. V. Ossolineum 1982; ZS MKO Wara 1980).

Być może zastosowanie innych metod numerycznych ułatwiłoby to zadanie. Wymienić tu można metodę przemiennej fazy, którą wykorzystano już przez Autorów niniejszego omówienia do modelowania analogicznego problemu (Journal of Crystal Growth, 61, 1983, 629-636). Zastosowanie modeli "sprzężonych" jakościowo zmienia możliwości symulacji procesu i znacznie zwiększa ilość informacji dostarczanych technologom.

Bogate wyposażenie instytutu w Aachen pozwoliłoby na praktyczne wykorzystanie omówionych modeli numerycznych.

Eisuke Nuyama: Shrinkage prediction using numerical simulation.
(Hitachi Research Laboratory)

Praca ta w swojej istocie sprowadza się do opisu i pokazania przykładów numerycznej symulacji przepływu ciepła w objętości odlewu i formy. Gdyby nie nazwiska autorów artykułu można by sądzić, że praca została wykonana w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej. Takie elementy metody numerycznej, jak zadanie maszynie cyfrowej złożonego kształtu układu odlew-forma, zastosowanie metody różnicowej dla siatek o zmiennym kroku, wprowadzenie do rozważań zastępczej pojemności cieplnej strefy przejściowej itd. są praktycznie takie same, jakie stosujemy przy obliczeniach procesu przepływu ciepła dla złożonych geometrycznie odlewów (por. np. praca NB dotycząca obliczeń krzepnięcia korpusu walcarki i wieńców kół zębatych dla Huty Dzierżyński, polski referat na 46 Kongresie CIATF itd.).

Autorzy pracy rozwiązują najczęściej zadania dwuwymiarowe, chociaż podają, że dysponują również programami dla zadań trójwymiarowych. Sposób podejścia do zadań przestrzennych jest przy tym taki sam, jaki zastosowaliśmy w wymienionej już pracy dla Huty "Dzierżyński", tzn. podział w kierunku trzeciego wymiaru na "plastry", w których zapisuje się macierz identyfikującą kształt kolejnego przekroju poprzecznego układu odlew-forma.

Na podstawie otrzymanych pól temperatury, autorzy analizują kinetykę krzepnięcia odlewu oraz możliwości jego zasilania. Podobną analizę przedstawiliśmy m.in. w referacie na Kongresie CIATF w Budapeszcie. Autorzy podają również informacje dotyczące czasu przygotowania danych i czasu obliczeń numerycznych. I tak np. przeciętny program dwuwymiarowy wymaga około 60 minut dla wprowadzenia danych (chodzi tu prawdopodobnie o wprowadzenie danych dotyczących kształtu obiektu) i czas ten jest porównywalny z naszymi doświadczeniami w tym zakresie, czas symulacji numerycznej wynosi przeciętnie 60 s, wyprowadzenie zaś wyników około 5 min. Bez komentarzy pozostawimy fakt, że dla analogicznych wykonywanych w Instytucie obliczeń czas pracy maszyny jest znacznie dłuższy.

Z omawianej pracy wynika jeszcze jeden wniosek: najbardziej pracochłonną częścią w obliczeniach cieplnych jest wprowadzenie danych (zaprojektowanie siatki różnicowej i przyporządkowanie jej węzłom odpowiednich podobszarów układu). Stąd też wynika potrzeba podjęcia prac w zakresie automatycznej (bez ingerencji użytkownika programu) generacji siatki. W jednej z prac, która będzie w najbliższym czasie prezentowana na Konf. Kom. Met. PAN podane zostaną informacje związane z komputerowym generowaniem siatki dla ukośnokątnych węzłów cieplnych w objętości odlewu.

Preben N. Hansen: Simulation and modeling of hot cracking in steel castings (Techn. Univ. of Denmark)

Pęknięcie na gorąco jest jednym z bardzo ważnych problemów teorii i praktyki odlewniczej. Zestawienie dotyczące publikacji omawiających to zjawisko zawiera prawie 300 pozycji. Głównym powodem pojawienia się takiej liczby prac jest potrzeba szczegółowego rozpoznania zjawiska i związków między przebiegiem krzepnięcia a pęknięciami odlewów. Zdaniem Autora jedynie metody komputerowe mogą w sposób precyzyjny symulować proces cieplny w sprzężeniu ze zjawiskami mechanicznymi.

W rozdziale II artykułu Autor przedstawia w skrócie metodę numeryczną, jakiej użył dla obliczenia niestacjonarnych pól temperatury w objętości osiowo-symetrycznego odlewu próbnego. Jest to metoda różnicowa w postaci jawnej z wykorzystaniem entalpii fizycznej metalu, równocześnie Autor wyjaśnia, że ze względu na przemianę fazową algorytm metody elementów skończonych nie jest efektywny i zbyt kosztowny. Pogląd ten jest słuszny, jeżeli rozważa się model matematyczny bezpośredni, a nie pewne jego formalne modyfikacje (przyp. autorów). Lokalizacja pęknięć w ujęciu P. Hansena polega na konstrukcji linii normalnych do linii izosolidusowych (odpowiadających kolejnym położeniom izotermy granicznej ciec – ciało stałe) i pokazaniu, że pęknięcia zarejestrowane na odlewie rzeczywistym, którego kształt odpowiadał dokładnie kształtowi odlewu liczonego, lokalizują się wzdłuż jednej z tych linii, której początek znajduje się w miejscu skokowej zmiany średnicy odlewu próbnego.

Wydaje się, że taki sposób podejścia do zagadnienia nie uwzględnia złożoności zjawisk mechanicznych towarzyszących procesowi krzepnięcia (porównaj liczne prace Parkitnego i jego zespołu) oraz że taki sposób lokalizacji pęknięć jest w przypadku odlewów o kształtach złożonych nieprzydatny. Należy jednak stwierdzić, że analiza jakościowa zjawiska przeprowadzona jest przez P. Hansena prawidłowo.

Clyne T.W.: Numerical treatment of RSP (University of Surrey-England)

Zdaniem Autora pracy proces szybkiego chłodzenia metali (Rapid Solidification Process) nie jest jeszcze dostatecznie zbadany, zwłaszcza dotyczy to zjawisk zarodkowania i wzrostu.

Analizując procesy cieplne w objętości ciekłego metalu oraz na powierzchni kontaktu metalu z podłożem podano szereg informacji na temat wpływu warunków stygnięcia (liczba kryterialna B_i , współczynnik wymiany ciepła) na przebieg krzepnięcia. Możliwe to było dzięki zastosowaniu modelu numerycznego do obliczeń pola temperatury w omawianym układzie.

W pracy zwrócono uwagę na zjawisko rekalescencji występującej w momencie zarodkowania fazy stałej i podano kryteria jej występowania.

Autorzy omowienia nie komentują szerzej przedstawionych tu wyników, gdyż wykraczają one poza obszar ich zainteresowań.