

MODELOWANIE NUMERYCZNE PROCESÓW PRZETWÓRSTWA TWORZYW



Wtryskiwanie to jedna z najważniejszych metod przetwórstwa tworzyw polimerowych. Pozwala na otrzymywanie wyrobów o skomplikowanych kształtach i dużej dokładności wymiarowej, w jednej operacji technologicznej i często bez konieczności operacji dodatkowych.



Przykłady przedmiotów wykonanych za pomocą wtryskiwania

WTRYSKIWANIE polega na nagrzeniu porcji materiału wyjściowego, na ogół w postaci granulek lub drobnej krajanki, do stanu plastycznego, a następnie wtrysnięciu go pod wysokim ciśnieniem do zamkniętej formy, której gniazdo odwzorowuje kształt wytwarzanego elementu. Po wtrysnięciu tworzywo zestala się na skutek spadku temperatury. Po zestaleniu się tworzywa, gotowa kształtka jest usuwana z wnętrza formy wtryskowej.

Surowiec – tworzywo termoplastyczne w postaci granulatu



Ważną cechą procesu wtryskiwania jest jego **cykliczność**. Cykl procesu wtryskiwania składa się z sześciu podstawowych faz:

- 1) zamykanie formy wtryskowej,
- 2) wtrysk,
- 3) docisk,
- 4) uplastycznienie,
- 5) otwieranie,
- 6) przerwa.



Najważniejszymi parametrami wtryskiwania, warunkującymi wysoką jakość wytwarzanego wyrobu są:

- a) czas,
- b) ciśnienie,
- c) temperatura.



Okno ustawień parametrów wtryskiwania we wtryskarce Arburg



Wpływ **CZASU** w procesie wtryskiwania:

- czas trwania fazy wtrysku musi pozwolić na całkowite wypełnienie gniazda formującego przez tworzywo,
- czas trwania fazy docisku musi umożliwić wprowadzenie uzupełniającej porcji tworzywa do gniazda zanim zastygnie przewężka,
- czas chłodzenia musi zapewnić całkowite zastygnięcie tworzywa i zestalenie wypraski, aby uzyskać wystarczające właściwości mechaniczne pozwalające na bezpieczne wyjęcie z gniazda bez ryzyka deformacji lub zniszczenia,
- czas chłodzenia ma wpływ na wartość skurczu wtryskowego i deformacji wypraski, które decydują o jej dokładności wymiarowej,
- całkowity czas cyklu wtryskiwania ze względów ekonomicznych powinien być jak najkrótszy.



Wpływ **TEMPERATURY** w procesie wtryskiwania:

- temperatura tworzywa uplastycznionego w cylindrze powinna zawierać się w pewnym optymalnym zakresie, określonym dla danego tworzywa w jego karcie technologicznej, gwarantującym odpowiednią płynność wystarczającą do wypełnienia formy i dokładnego odtworzenia szczegółów gniazda formującego,
- zbyt niska temperatura powoduje wzrost lepkości i trudności z wypełnieniem gniazda, wymusza stosowanie wyższego ciśnienia wtryskiwania,
- zbyt wysoka temperatura powoduje degradację cieplną tworzywa, powstanie wad wypraski (np. przypalenia) i znaczący spadek jakości produktu.



Wpływ **CIŚNIENIA** w procesie wtryskiwania:

- wartość **ciśnienia wtrysku** musi zapewnić całkowite wypełnienie gniazda formującego przez tworzywo,
- wartość **ciśnienia docisku** wpływa na ilość uzupełnionego tworzywa w gnieździe formy, co ma znaczący wpływ na skurcz wypraski i jej dokładność wymiarową,
- konstrukcja kanałów doprowadzających tworzywo musi zapewnić jak **najmniejszy spadek ciśnienia** między układem uplastyczniającym a gniazdem w formie wtryskowej,
- przebieg procesu wtryskiwania musi zapewnić jak **najniższą wartość ciśnienia szczątkowego**, jakie występuje w wyprasce po otwarciu formy, bowiem wpływa ono negatywnie na deformację oraz może powodować pękanie gotowej wypraski.



WYBRANE NEGATYWNE ZJAWISKA WPŁYWAJĄCE NA WYPRASKĘ WTRYSKOWĄ

Najważniejsze ze zjawisk fizycznych, które mają negatywny wpływ na dokładność wymiarową, jakość i właściwości użytkowe wyprasek wtryskowych to: **skurcz wtryskowy** (shrinkage), **wypaczenie** (warpage) i **deformacja** (deformation).



Zdeformowane wypraski wtryskowe

SKURCZ PRZETWÓRCZY

Skurcz przetwórczy jest to zmniejszenie objętości lub zmniejszenie wymiarów wytworu z tworzywa w stosunku do objętości lub odpowiadających wymiarów gniazda formującego narzędzia przetwórczego, zachodzące podczas końcowej fazy procesu przetwórstwa i w określonym czasie po jego zakończeniu.

Skurcz przetwórczy występuje w różnych metodach przetwórstwa. W przypadku wtryskiwania występuje **skurcz wtryskowy**.

Podstawową przyczyną skurczu jest zmiana objętości tworzywa podczas jego ochładzania.



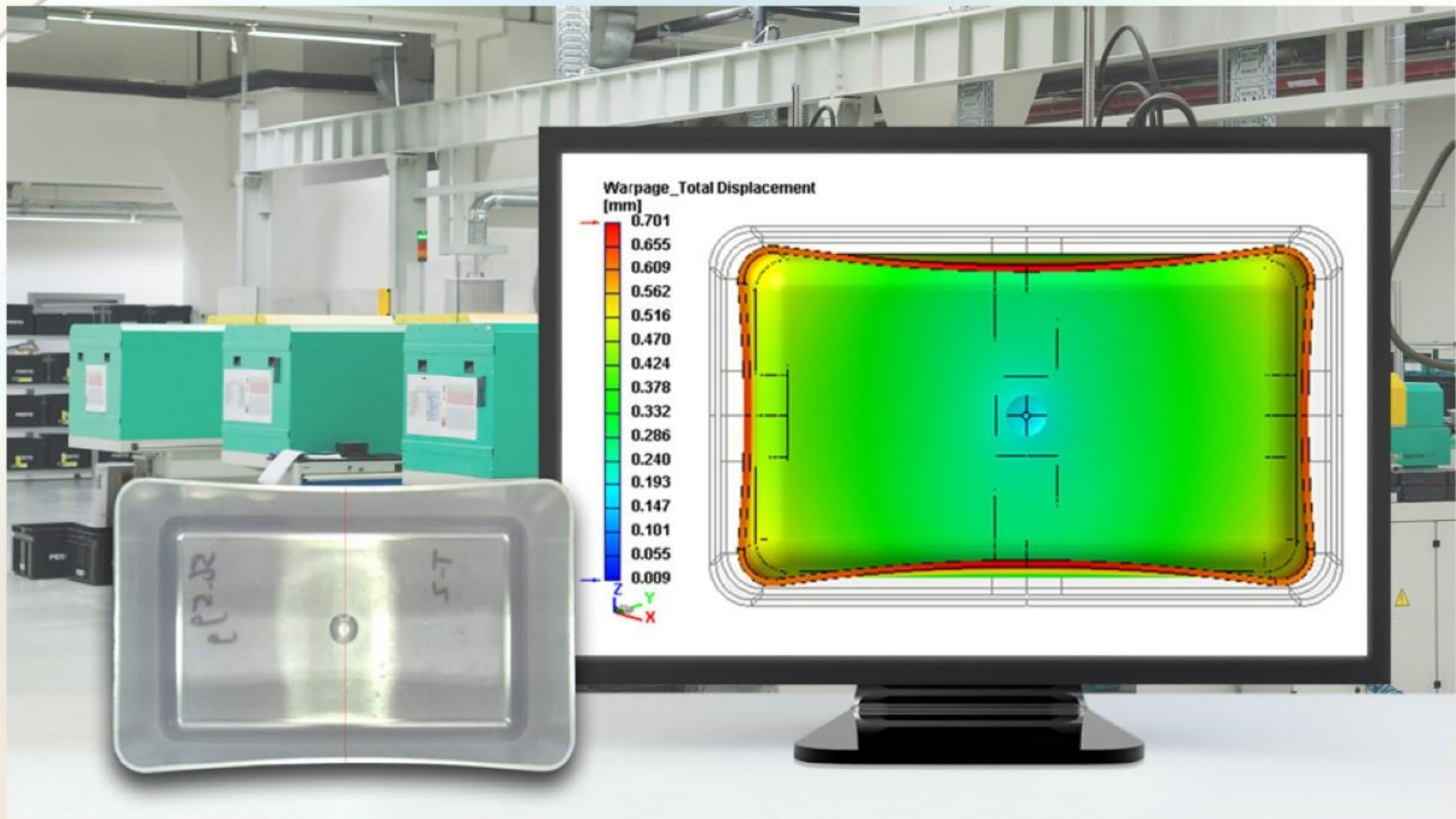
WYPACZENIE

Wypaczenie to różnica pomiędzy kształtem gniazda formującego a rzeczywistym kształtem wypraski. Wypaczenie jest spowodowane głównie poprzez gradient temperatury w różnych punktach wypraski oraz przez wynikające z konstrukcji wypraski różnice w grubości jej ścianek.

Wypaczenie jest czasem nazywane odkształceniem przetwórczym.



Mechanizm wypaczenia na skutek różnicy temperatur w różnych obszarach formy wtryskowej


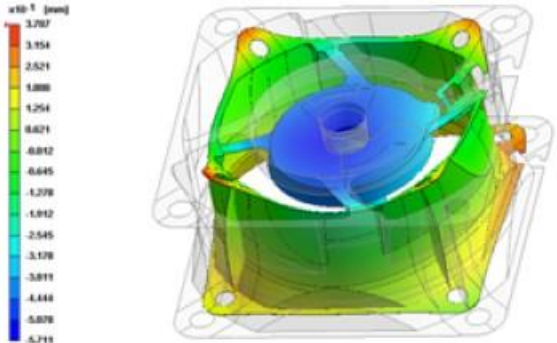
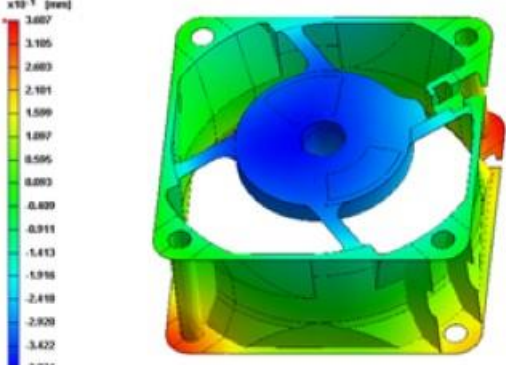


Przykład analizy numerycznej wypaczenia i zdeformowana wypraska wtryskowa



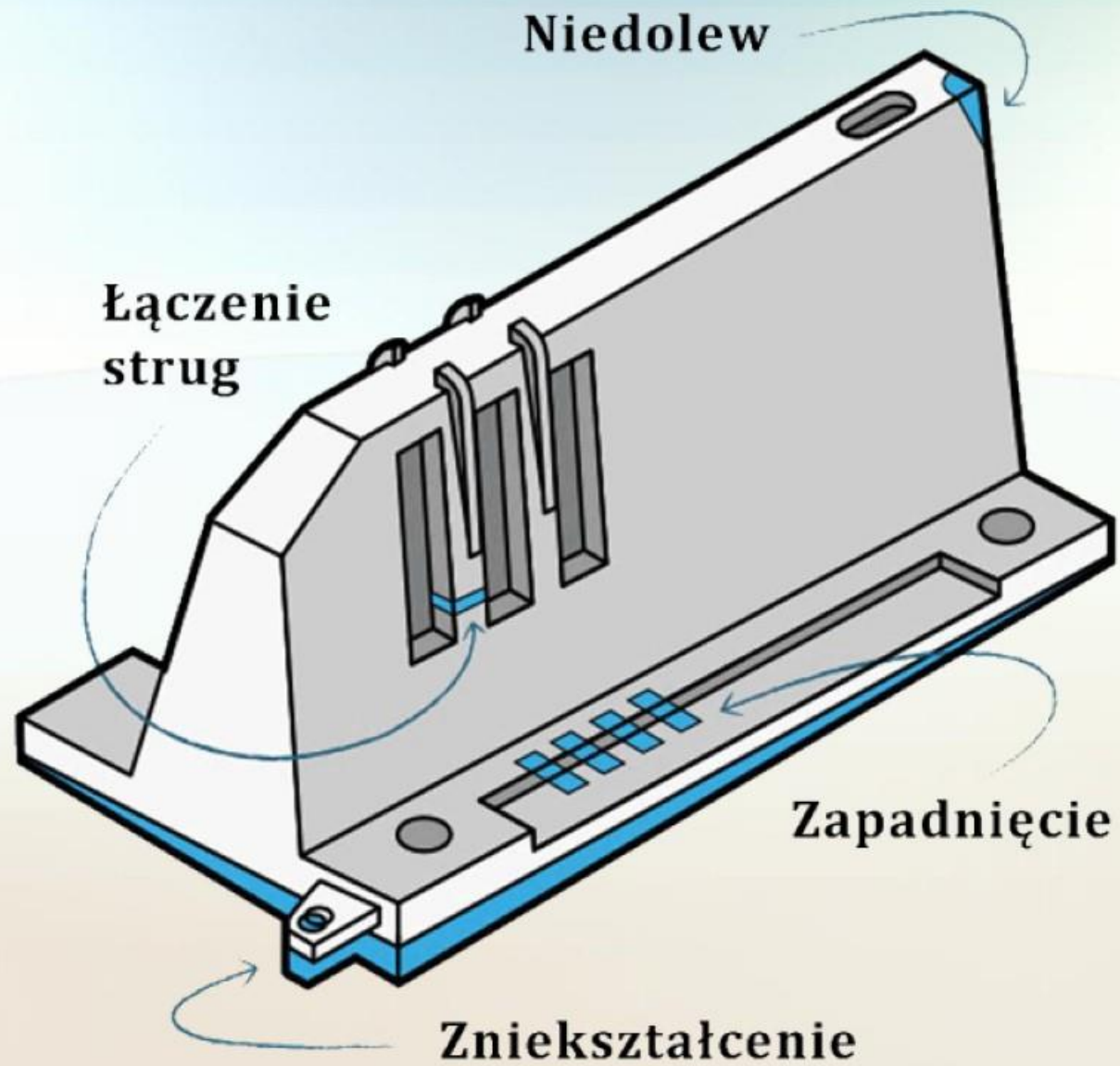
DEFORMACJA

Deformacja stanowi sumę skurczu i wypaczenia. Niekiedy deformacja jest określana jako zniekształcenie.

Part	Initial Proposal	Final Proposal
		
	Z: -0.571~0.379mm	Z: -0.392~0.361mm

Wypraska wtryskowa i wyniki analizy numerycznej, wskazujące różną wartość jej deformacji





Typowe wady i anomalie, jakie mogą wystąpić na wyprawce wtryskowej



Podczas **konstruowania wypraski** istotne znaczenie ma wiele czynników, wśród których między innymi należy wymienić:

- **charakterystykę geometryczną wypraski – kształt, wymiary i dokładność wykonania,**
- **cechy funkcjonalne projektowanego przedmiotu,**
- **przestrzeganie zasad zachowania technologiczności wyprasek wtryskowych,**
- **właściwości planowanego do użycia tworzywa (w tym zawartość napętniaczy),**
- **właściwe warunki ochładzania wypraski i sposób jej usunięcia z formy wtryskowej.**



Otrzymanie **wypraski o wysokich walorach użytkowych** wymaga prawidłowego doboru parametrów procesu, rodzaju tworzywa, narzędzia o odpowiedniej konstrukcji i maszyny przetwórczej o określonych możliwościach technologicznych.

Prawidłowo zaprojektowana wypraska jest źródłem informacji, na podstawie których dobiera się rodzaj tworzywa, konstruuje formę wtryskową i określa parametry technologiczne wtryskiwania.

Ostateczne ustalenie warunków technologicznych procesu stanowi kompromis między oczekiwaną jak największą **wydajnością wtryskiwania**, a akceptowalnym poziomem **jakości wykonania** wypraski i jej cech użytkowych.



Z uwagi na bardzo wysokie koszty wytwarzania form wtryskowych niezbędne jest **zmniejszenie do minimum ryzyka wystąpienia błędów** na każdym z etapów przygotowywania procesu produkcyjnego.

Dzięki symulacji komputerowej i analizie otrzymanych wyników już na etapie projektowania można wyeliminować wiele błędów konstrukcyjnych i technologicznych, dzięki temu znacząco obniżając koszty oraz skracając czas przygotowania produkcji.



Oprogramowanie CAE przeznaczone do modelowania numerycznego wtryskiwania umożliwia **symulację zjawisk zachodzących podczas wypełniania gniazda** formującego formy wtryskowej tworzywem i **uzupełniania tworzywa w fazie docisku**, jak również służy do wykonania późniejszej analizy **ochładzania wypraski, skurczu przetwórczego, wypaczenia i deformacji** gotowego wyrobu.

Przygotowanie symulacji zjawisk zachodzących podczas procesu wtryskiwania wymaga wprowadzenia danych wejściowych jako trzech ogólnych charakterystyk dotyczących:

- kształtu i wymiarów wypraski,
- właściwości tworzywa przetwarzanego
- warunków procesu.



Symulacja płynięcia tworzywa i wypełniania gniazda formującego oraz wynikający z niej opis numeryczny procesu wtryskiwania ułatwia optymalizację konstrukcji formy, ustalenie parametrów procesu i dobór wtryskarki o odpowiednich możliwościach technologicznych w celu uzyskania wypraski o odpowiedniej jakości.

Analizie poddawane są czynniki wpływające na zachowanie się tworzywa w trakcie procesu, między innymi ciśnienie wtryskiwania, ciśnienie docisku, grubość ścianek wypraski, temperatura tworzywa i temperatura gniazda formującego formy wtryskowej.



Symulacja ochładzania wypraski wtryskowej ma na celu optymalizację konstrukcji formy, w której układ chłodzenia projektuje się w taki sposób, aby osiągnąć możliwie najbardziej równomierną intensywność ochładzania przy jednoczesnym zachowaniu jak najkrótszego czasu cyklu procesu wtryskiwania.

Wyniki analizy ochładzania wypraski pozwalają na skrócenie czasu cyklu wtryskiwania i obniżenie kosztów wytwarzania bez straty jakości wytworu. Unika się przez to wysokich strat z powodu powstawania wyprasek wadliwych oraz konieczności występowania kosztowych dodatkowych operacji technologicznych, jakim musiałaby być poddawana gotowa wypraska już po zakończeniu procesu wtryskiwania.



Możliwość przeanalizowania skurczu przetwórczego oraz deformacji wypraski przy symulowanych różnych parametrach procesu wtryskiwania oraz modelowanie zróżnicowanych konstrukcyjnie układów chłodzenia formy umożliwia określenie położenia stref największego skurczu oraz deformacji.

Dzięki temu w fazie projektowania można przeprowadzić optymalizację konstrukcji formy, dobierając zarówno rodzaj materiału wkładek formujących jak i korygując odpowiednie wielkości geometryczne w celu zminimalizowania negatywnego wpływu skurczu przetwórczego i wypaczenia wypraski.



Do głównych zalet stosowania programów CAE służących do symulacji w procesie wtryskiwania należy zaliczyć możliwość obliczenia konkretnych parametrów procesu w poszczególnych jego fazach oraz możliwość ich wizualizacji.

Na podstawie danych wejściowych wprowadzanych do programu otrzymuje się informacje o wynikach fazy wypełnienia gniazda formy, wynikach fazy docisku, skutkach chłodzenia wypraski w formie i poza formą, a także dane o przebiegu skurczu i deformacjach, jakie powstały w trakcie ochładzania wypraski.

Uzyskane wyniki symulacji pozwalają na zoptymalizowanie procesu wtryskiwania oraz zmniejszają szanse na powstanie ewentualnych problemów technologicznych i konstrukcyjnych, poprzez ich wykluczanie na etapie symulacji, a przed produkcją.



Symulacja **fazy wtrysku** pozwala na:

- wizualizację wypełniania gniazda formującego (w tym czas fazy wtrysku),
- analizę temperatury tworzywa,
- analizę ciśnienia w gnieździe formy,
- analizę natężenia przepływu tworzywa i stopnia wypełnienia gniazda formującego,
- analizę rozkład naprężeń ścinających w płynącym tworzywie,
- analizę położenia frontu stopionego tworzywa i łączenia się strumieni tworzyw,
- analizę wielkości siły potrzebnej do zamknięcia formy,
- wskazanie anomalii procesu, takich jak pułapki powietrzne i niedolewy.



Symulacja **fazy docisku** umożliwia:

- ocenę uzupełnienia gniazda formującego tworzywem (w tym czas fazy docisku),
- analizę temperatury tworzywa i ciśnienia w gnieździe formy,
- określenie wad powierzchniowych wypraski.

Symulacja fazy docisku daje właściwe wyniki wtedy, gdy został zamodelowany układ doprowadzenia tworzywa, w tym przewężki.

Symulacja **ochładzania wypraski** pozwala na:

- określenie czasu potrzebnego do poprawnego ochłodzenia wypraski,
- analizę skurczu i deformacji wypraski,
- określenie czasu trwania pełnego cyklu wtryskowego,
- określenie skuteczności działania **układu chłodzenia wypraski**.

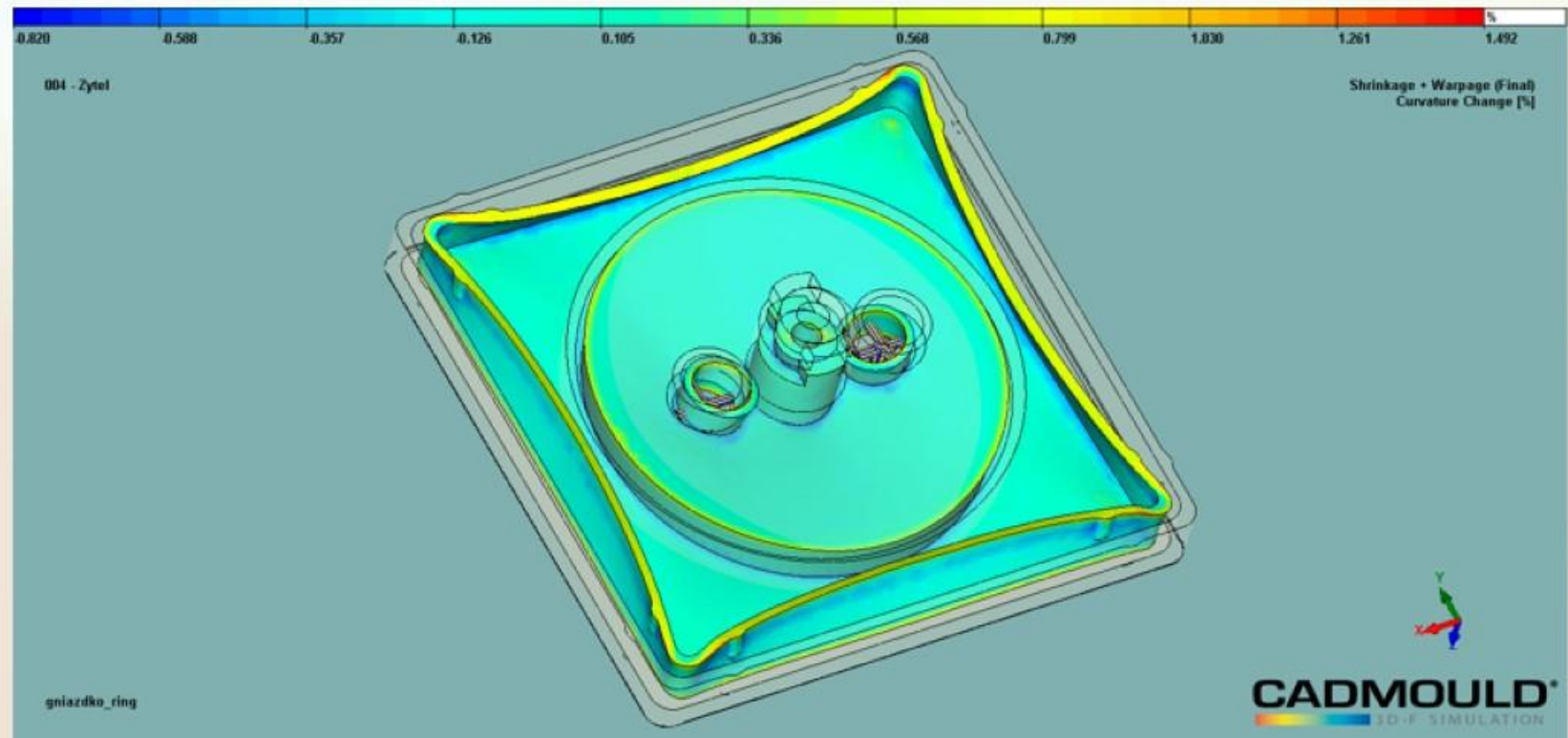


Analiza **skurczu i deformacji** wypraski:

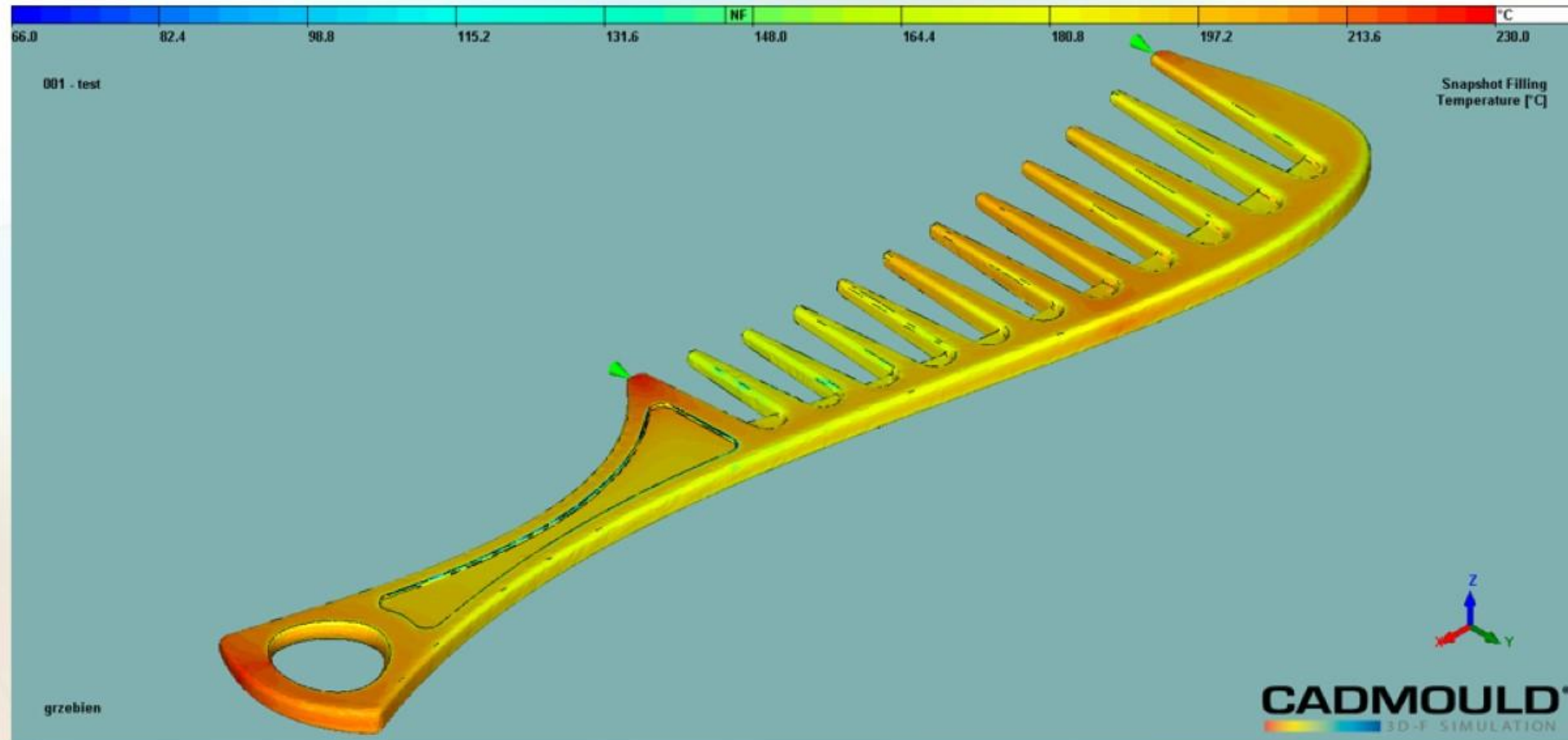
- umożliwia określenie skurczu liniowego i objętościowego,
- pozwala na określenie kierunków i wartości wypaczenia wypraski,
- daje możliwość wyznaczenia deformacji wypraski, co stanowi podstawę do korekty kształtu gniazda formującego.



Otrzymane wyniki symulacji pozwalają na dobór odpowiedniego tworzywa (zdolność do wypełnienia formy), wpływają na ustalenie właściwych parametrów technologicznych procesu (czas, ciśnienie i temperatura) i określają niektóre wymagania odnośnie formy wtryskowej (materiał i kształt oraz wymiary układu doprowadzenia tworzywa i układu chłodzenia) oraz wtryskarki (moc, siła zamknięcia, ciśnienie w układzie uplastyczniającym).



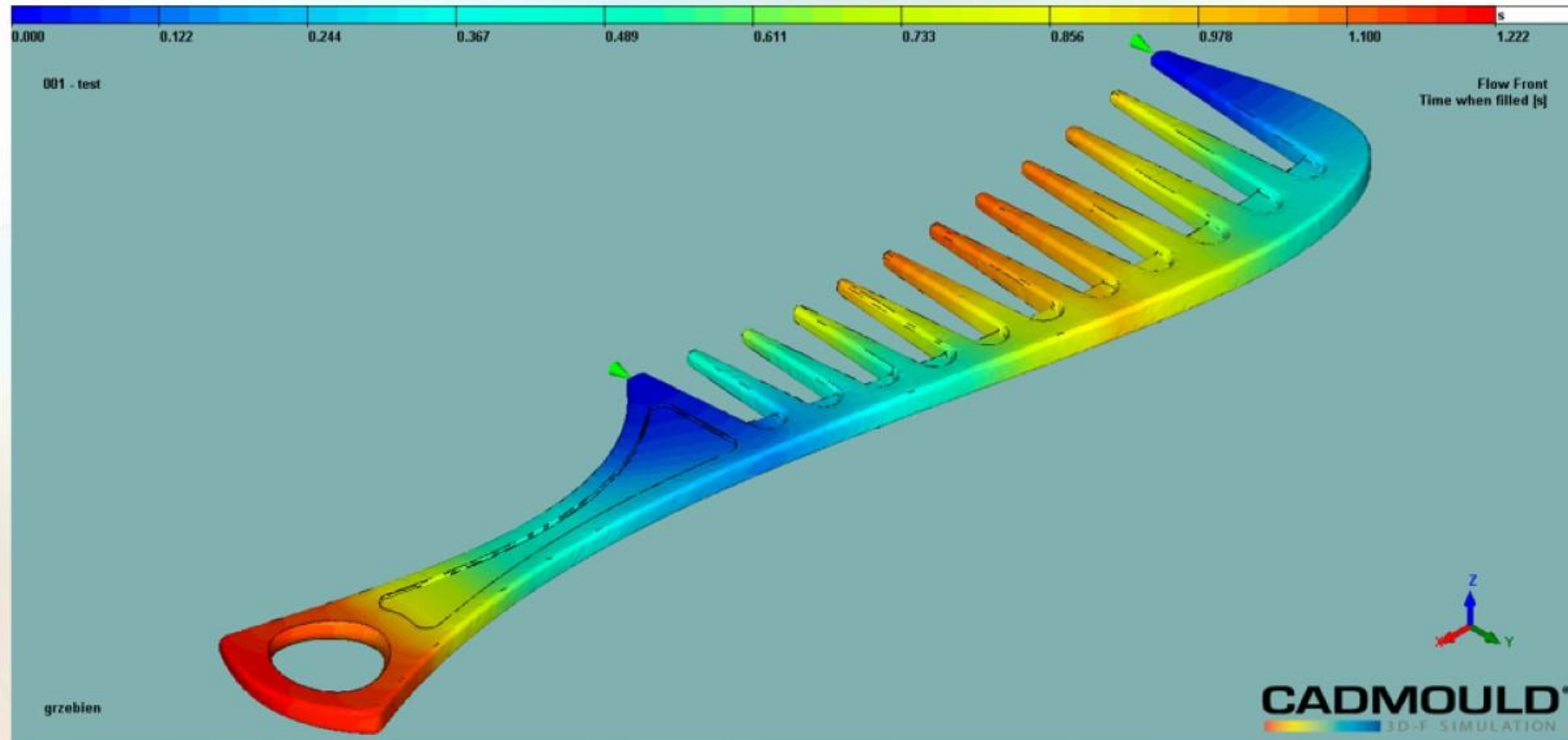
Przykłady wyników symulacji numerycznej otrzymanych za pomocą programu Cadmould 3D-F



Analiza fazy wtrysku – temperatura wypraski



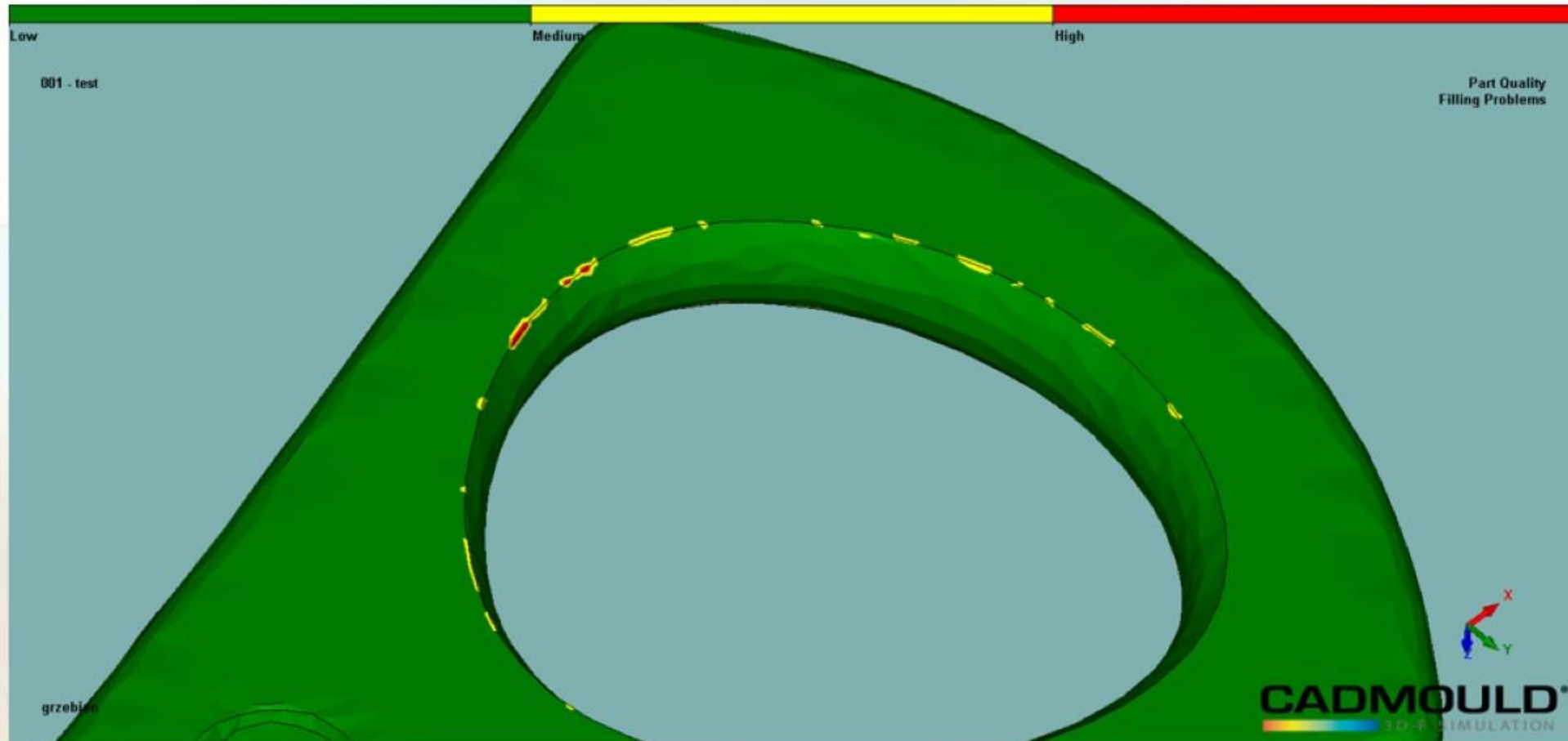
Przykłady wyników symulacji numerycznej otrzymanych za pomocą programu Cadmould 3D-F



Analiza fazy wtrysku – czas wypełniania gniazda formującego



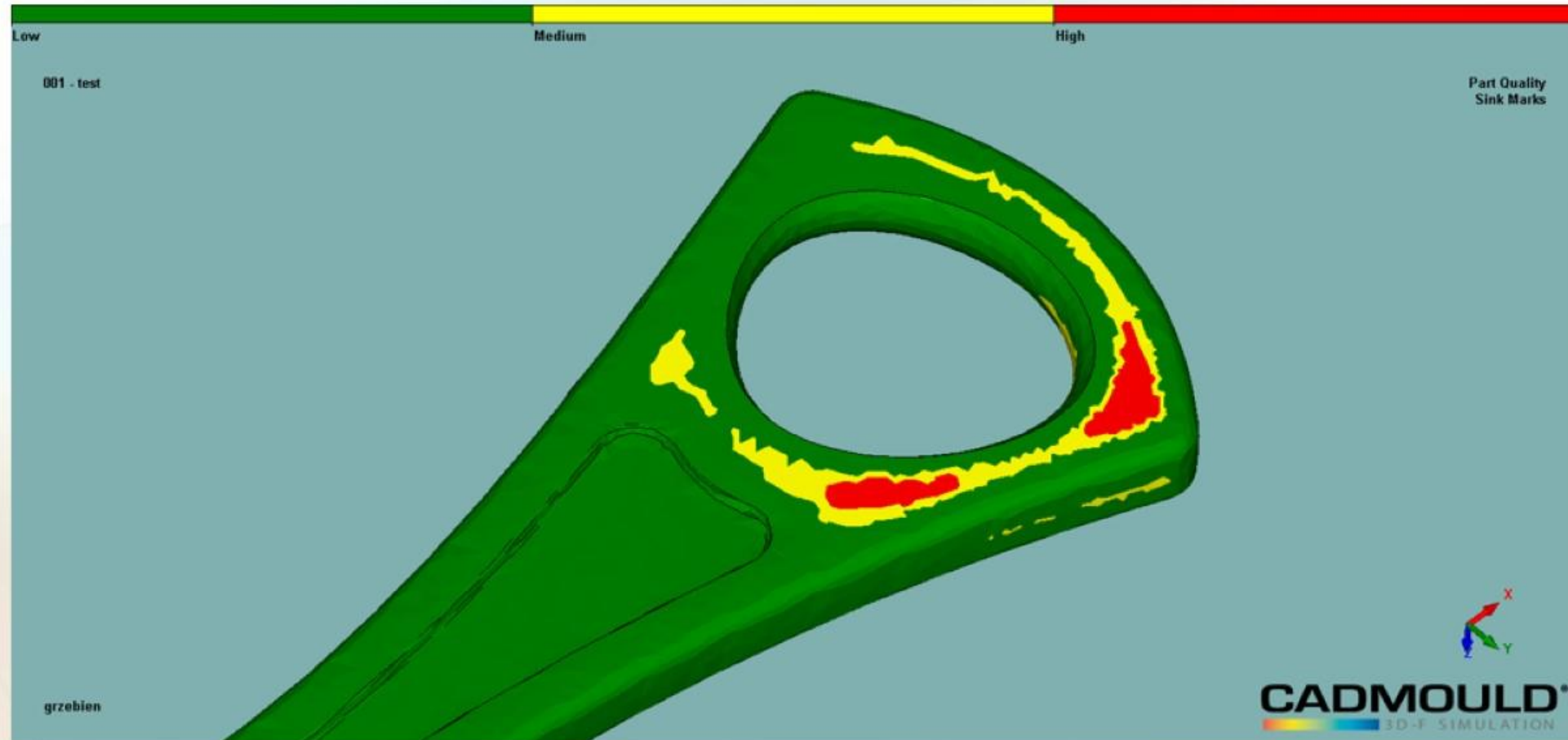
Przykłady wyników symulacji numerycznej otrzymanych za pomocą programu Cadmould 3D-F



Problemy z wypełnieniem gniazda formy (Filling problems)



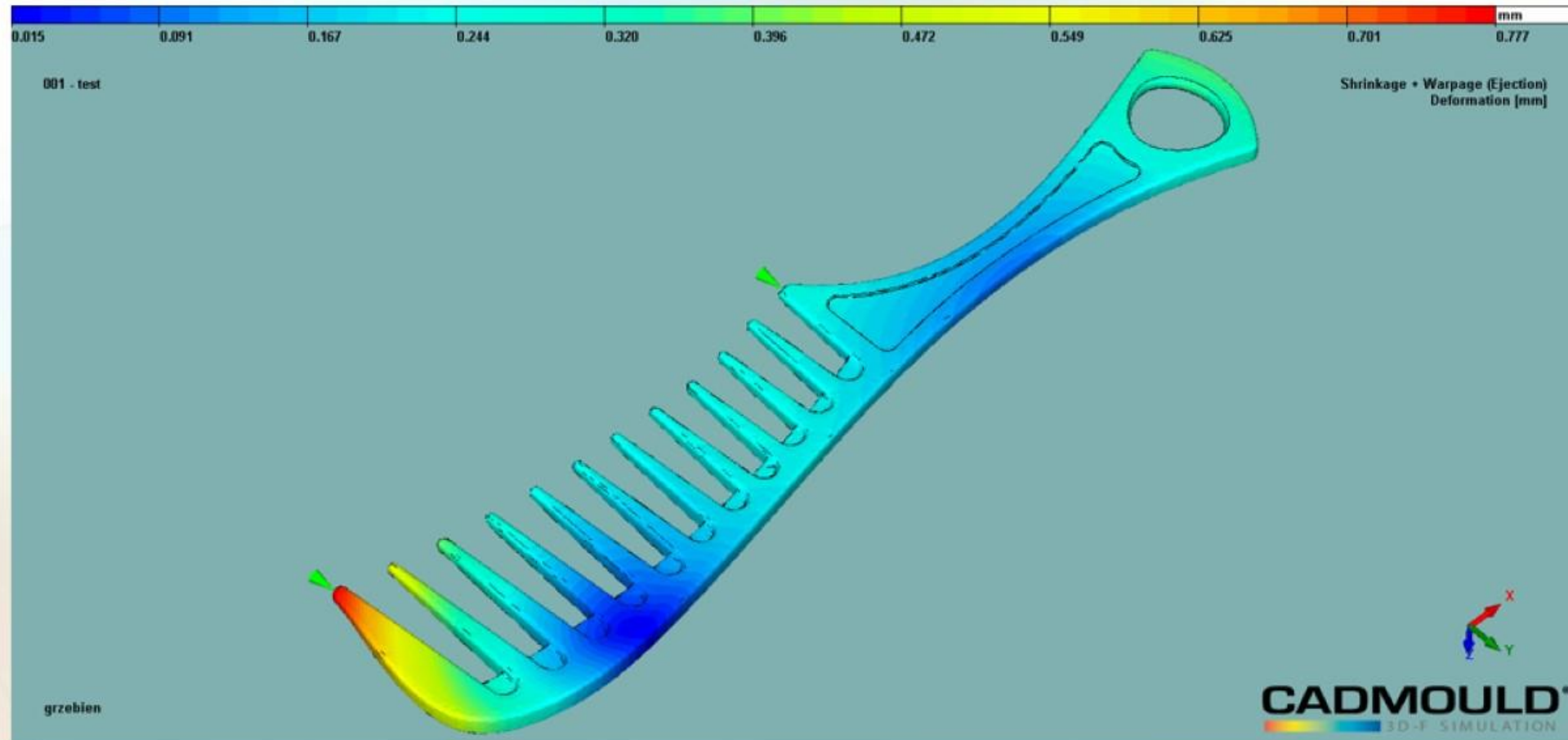
Przykłady wyników symulacji numerycznej otrzymanych za pomocą programu Cadmould 3D-F



Miejsca, gdzie mogą wystąpić zapadnięcia powierzchni (Sink marks)

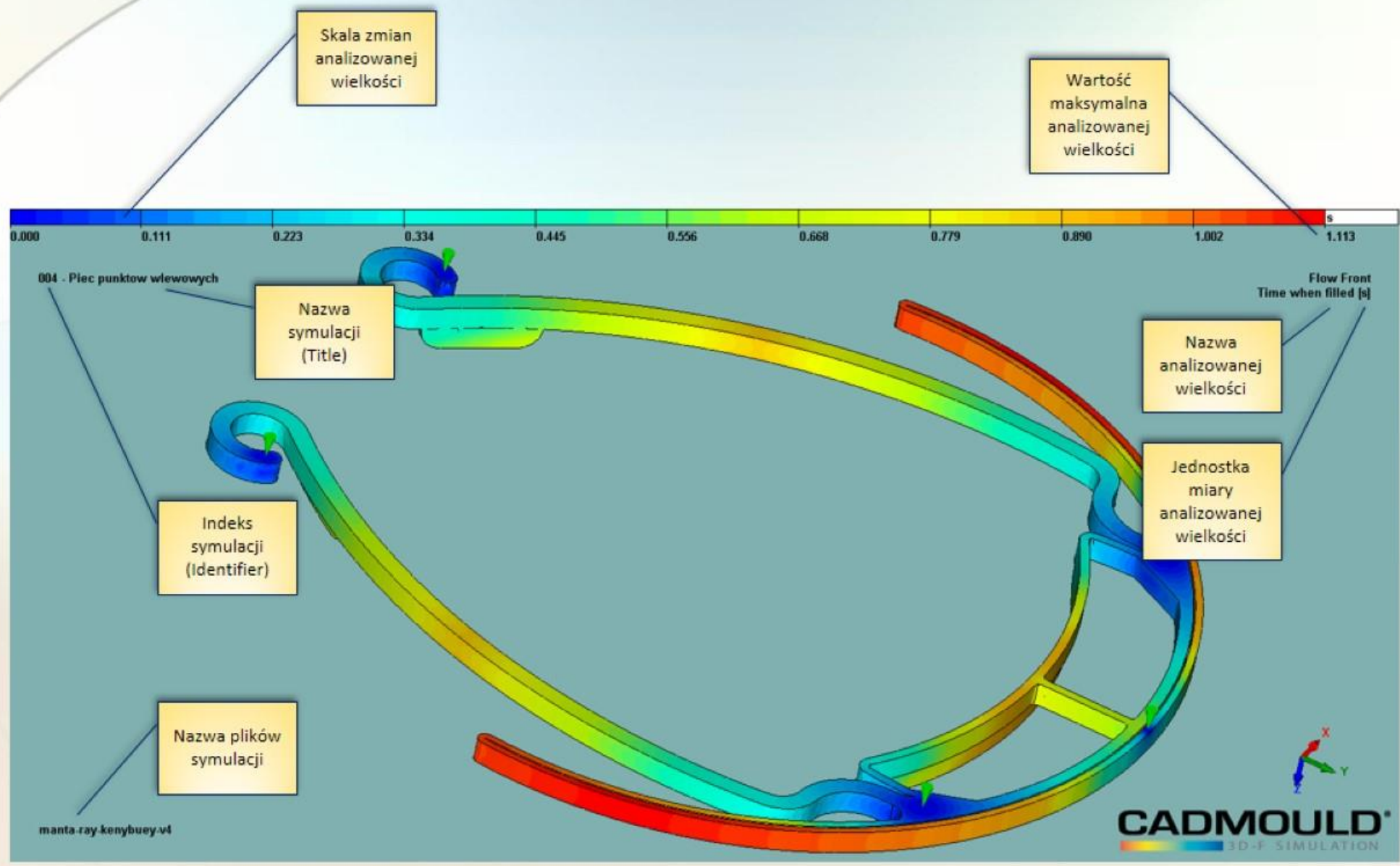


Przykłady wyników symulacji numerycznej otrzymanych za pomocą programu Cadmould 3D-F



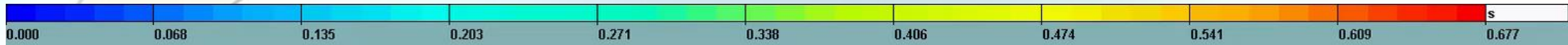
Deformacja, czyli skurcz i zniekształcenie razem (Deformation)





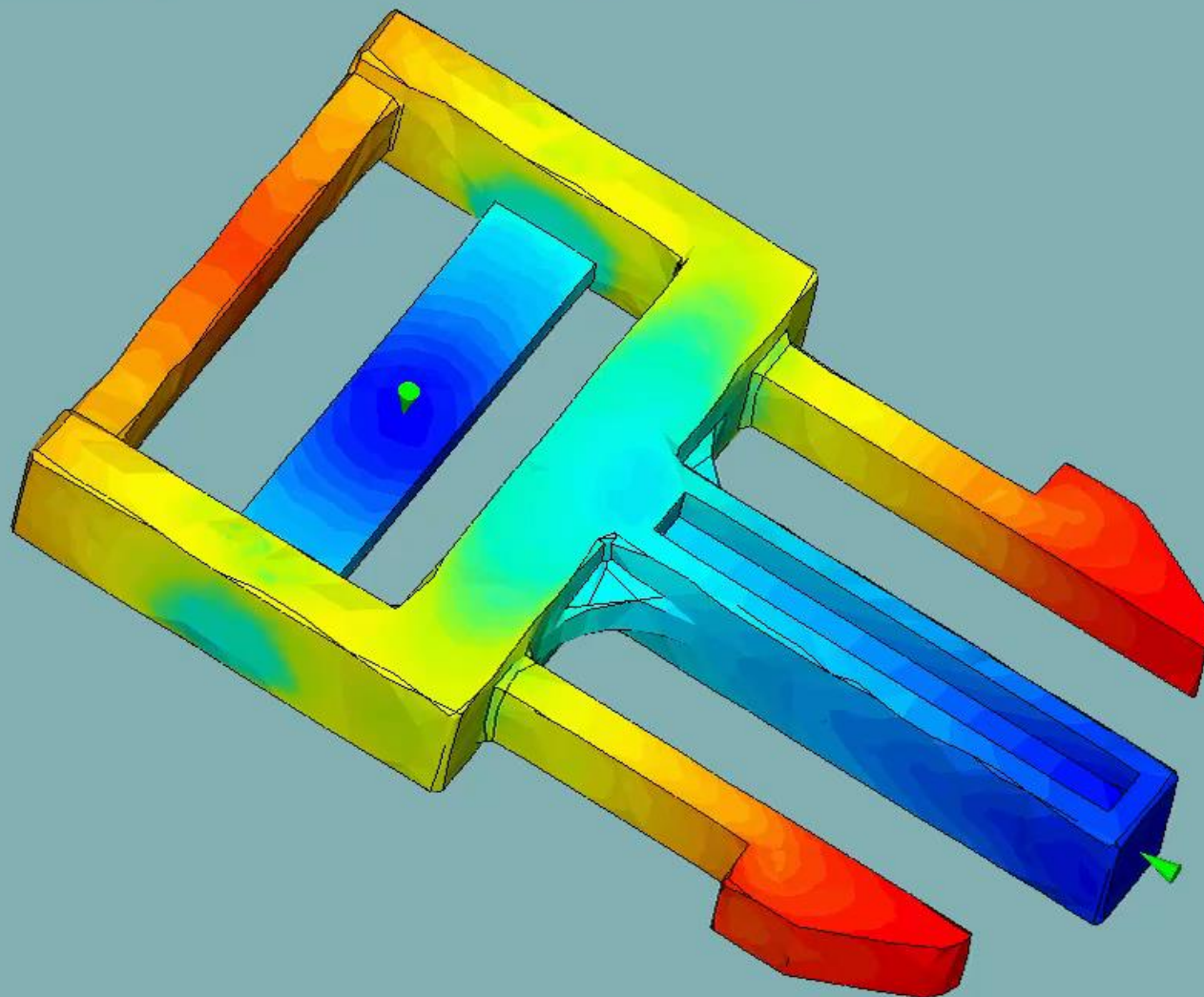
Wyniki symulacji w programie Cadmould 3D-F zapisane jako bitmapa





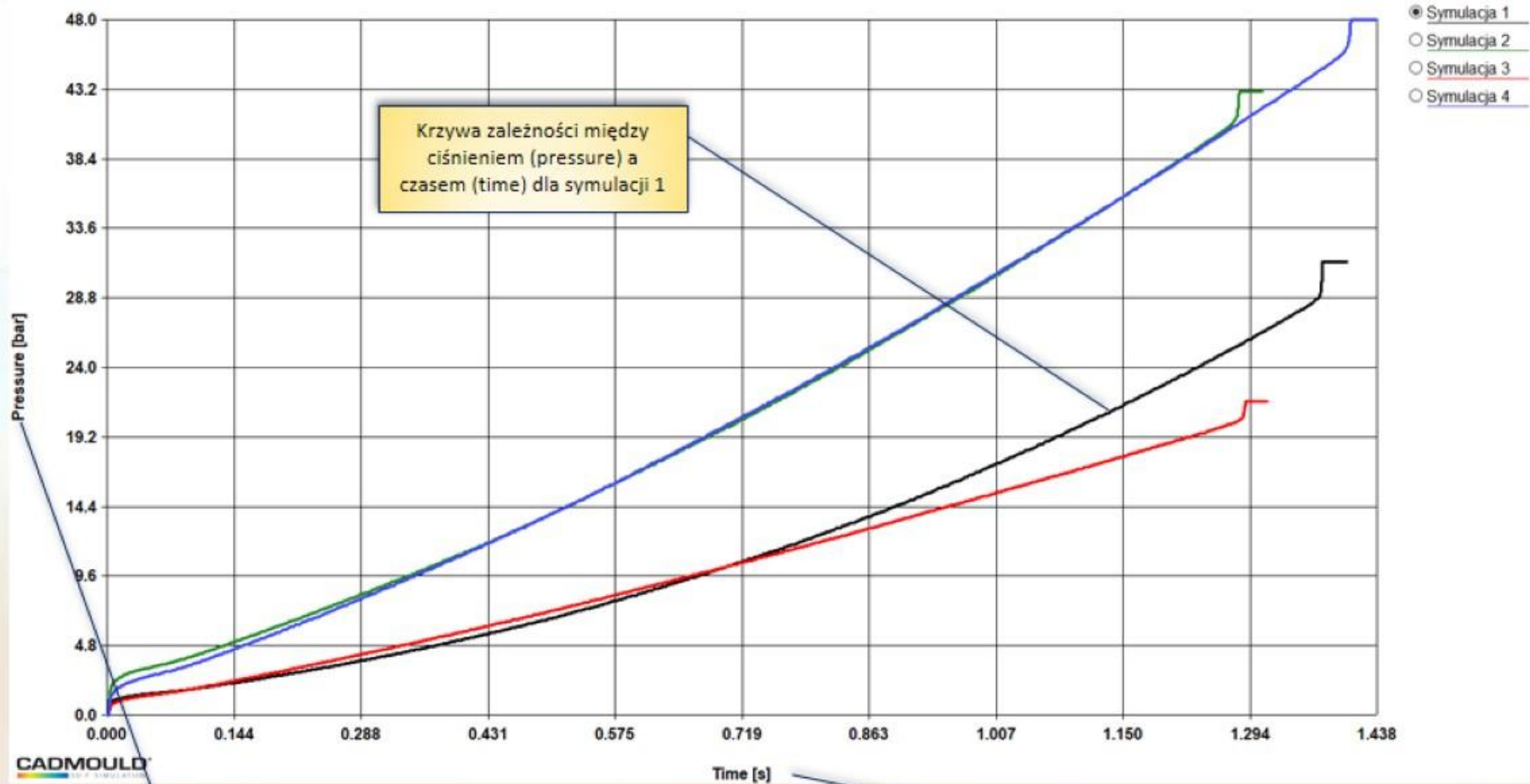
002 - zatrzask

Flow Front
Time when filled [s]



3DCLIPA





Wyniki symulacji w programie Cadmould 3D-F zapisane jako wykres



manta-ray-kenybuy-v4_002_Result_Summary — Notatnik

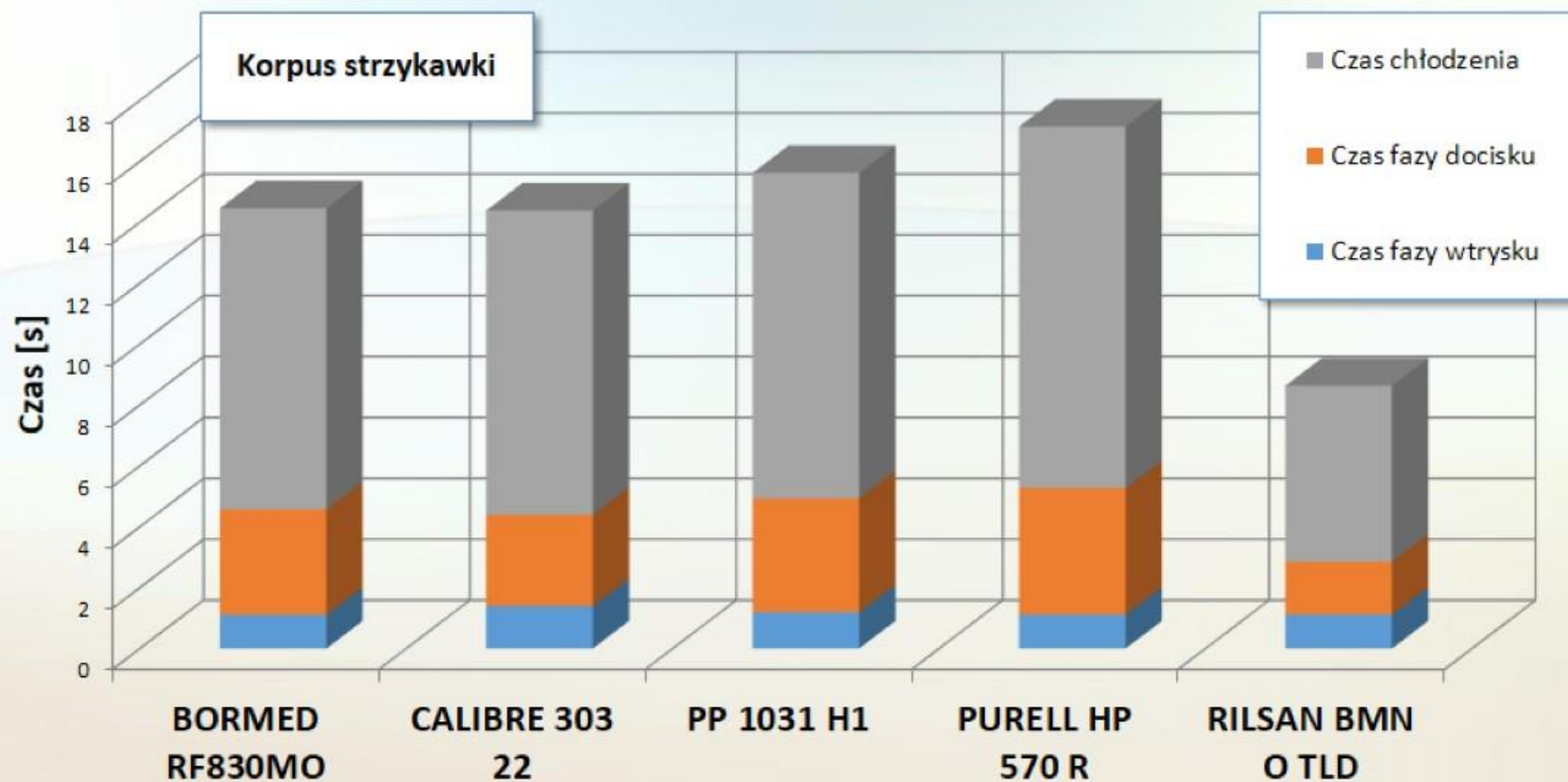
Plik Edycja Format Widok Pomoc

Filling

Time s	Level %	Flow Rate cm ³ /s	Pressure bar	Clamping Force X kN	Clamping Force Y kN	Clamping Force Z kN
0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.025	1	8.870	0.956	0.001	0.002	0.001
0.044	2	8.870	1.371	0.002	0.006	0.003
0.063	3	8.870	1.868	0.003	0.011	0.008
0.082	4	8.870	2.368	0.006	0.018	0.014
0.102	5	8.870	2.859	0.008	0.027	0.022
0.121	6	8.870	3.356	0.011	0.036	0.032
0.140	7	8.870	3.927	0.014	0.047	0.045
0.160	8	8.870	4.459	0.018	0.058	0.059
0.179	9	8.870	5.134	0.025	0.071	0.080
0.198	10	8.870	6.632	0.057	0.103	0.141
0.218	11	8.869	8.995	0.080	0.161	0.251
0.237	12	8.870	10.388	0.098	0.191	0.310
0.257	13	8.869	11.726	0.118	0.223	0.370
0.276	14	8.870	13.068	0.141	0.257	0.433
0.296	15	8.869	14.314	0.165	0.291	0.496
0.315	16	8.869	15.724	0.197	0.336	0.570
0.335	17	8.869	17.224	0.237	0.391	0.653
0.355	18	8.869	18.786	0.282	0.454	0.743

Fragment pliku tekstowego z symulacji zawierającego dane liczbowe, które po przeniesieniu do arkusza kalkulacyjnego i obróbce pozwalają na stworzenie wykresów określających zmianę w czasie natężenia przepływu, ciśnienia oraz siły zamknięcia formy w trzech osiach składowych.





*Przykład wykresu stworzonego w arkuszu kalkulacyjnym,
porównującego czasy poszczególnych faz cyklu wtryskowego dla różnych tworzyw,
wykorzystanych podczas analizy numerycznej*



Program Cadmould 3D-F generuje bardzo dużą liczbę wyników analiz, zróżnicowanych w formie ich przedstawienia i szczegółowości. W zależności od celu przeprowadzania symulacji analizuje się wybrane z nich.

Przygotowując raport z wykonanej symulacji dotyczącej analizy numerycznej procesu wtryskiwania należy wziąć pod uwagę konieczność przygotowania następujących informacji:

- **opisujących model (lub modele) wypraski,**
- **charakteryzujących właściwości użytego tworzywa (lub tworzyw),**
- **definiujących parametry technologiczne procesu,**
- **przedstawiających czytelnie otrzymane wyniki.**

Otrzymane wyniki symulacji komputerowej zwykle odnosi się do trzech typowych grup kryteriów: technologicznych, konstrukcyjnych lub ekonomicznych, które są znaczące z punktu widzenia celu wykonywania analizy numerycznej.



Jeśli bierze się pod uwagę **kryterium ekonomiczne**, z masy wyników wygenerowanych przed Cadmould 3D-F należy wybrać te, które wiążą się z czasem procesu i wielkościami, które są z nim związane – na pewno są to czasy faz cyklu wtryskowego, ale także natężenie przepływu tworzywa.

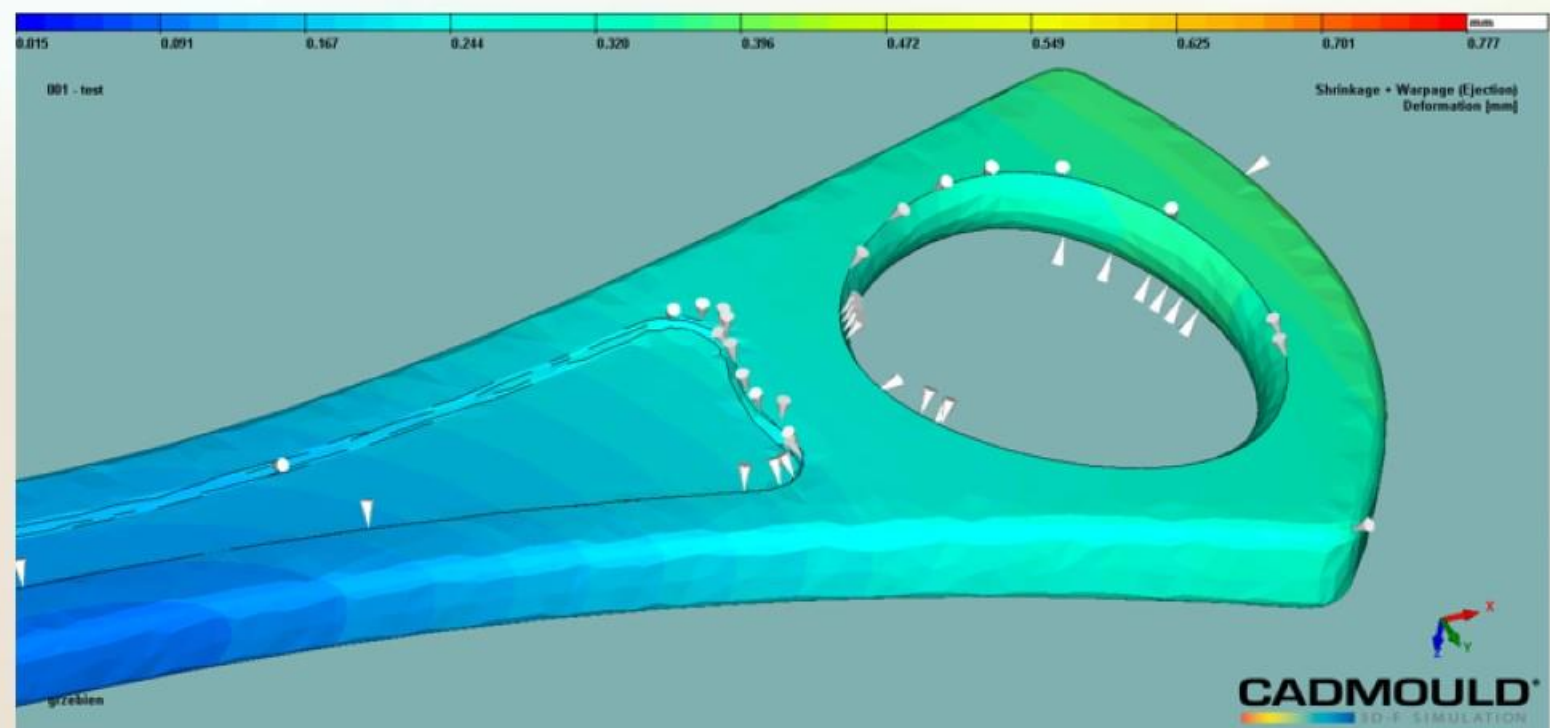
Jeżeli rozważa się **kryterium technologiczne**, trzeba przyjrzeć się grupie wielkości związanych z przebiegiem procesu:

- zapotrzebowaniem na moc wtryskarki,
- temperaturami, do jakich trzeba nagrzać tworzywo, a potem ochłodzić formę,
- prędkością ścinania (lub naprężeniami ścinającymi),
- siłami, jakie są potrzebne do zamknięcia formy wtryskowej.



Ponadto przy kryterium technologicznym sprawdza się poprawność wypełnienia formy (Filling Problems) i inne czynniki związane z przebiegiem procesu wtryskiwania:

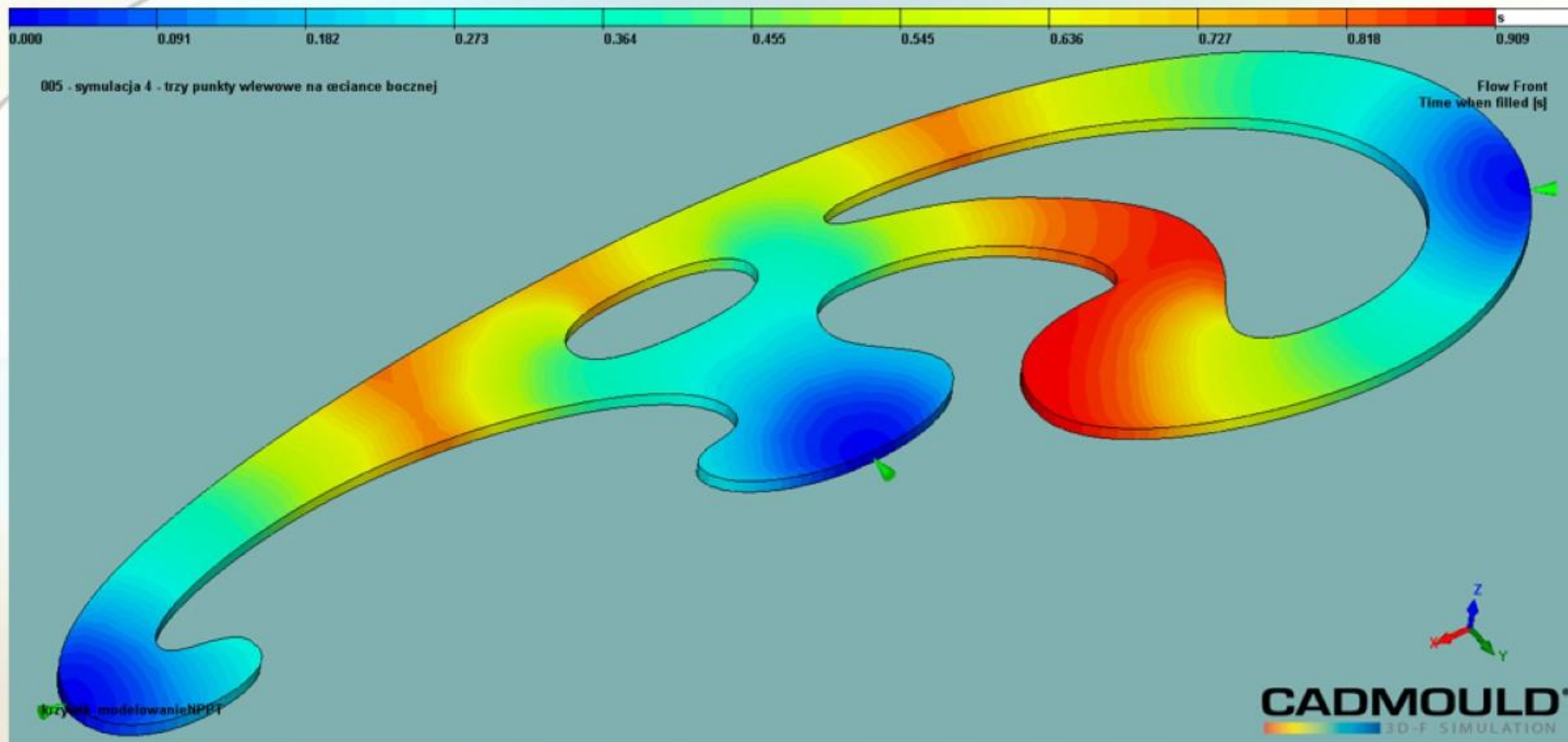
- występowanie pułapek powietrznych,
- kierunki płynięcia tworzywa,
- łączenie się strug tworzywa,
- orientację włókien, jeśli tworzywo zawiera ten rodzaj napelnacza.



Przy **kryterium jakościowym** na pewno musi być brana pod uwagę dokładność wymiarowa wypraski, a to wiąże się z koniecznością analizy warunków chłodzenia wypraski i określeniem wartości skurczu wtryskowego, zniekształcenia i deformacji, które należy odczytać z kolorowych bitmap.

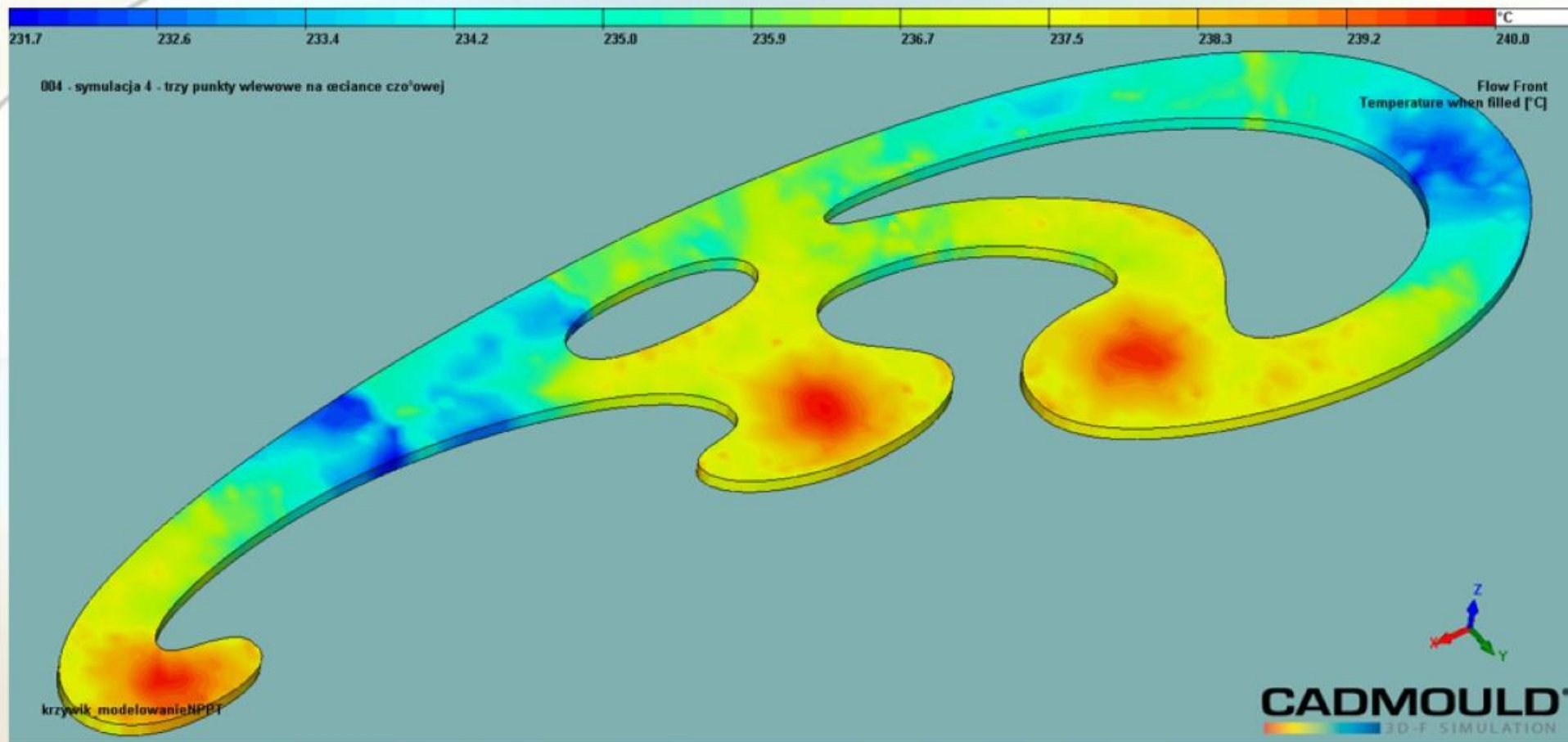
Sprawdza się również ryzyko wystąpienia zapadnięć (**Sink Marks**), natomiast trzeba mieć na uwadze, że nawet znaczny procent zapadnięć nie musi dyskwalifikować sposobu wykonania wypraski, jeśli okaże się, że wartość tych zapadnięć mieści się w granicy tolerancji wykonania wypraski, założonej przez konstruktora.





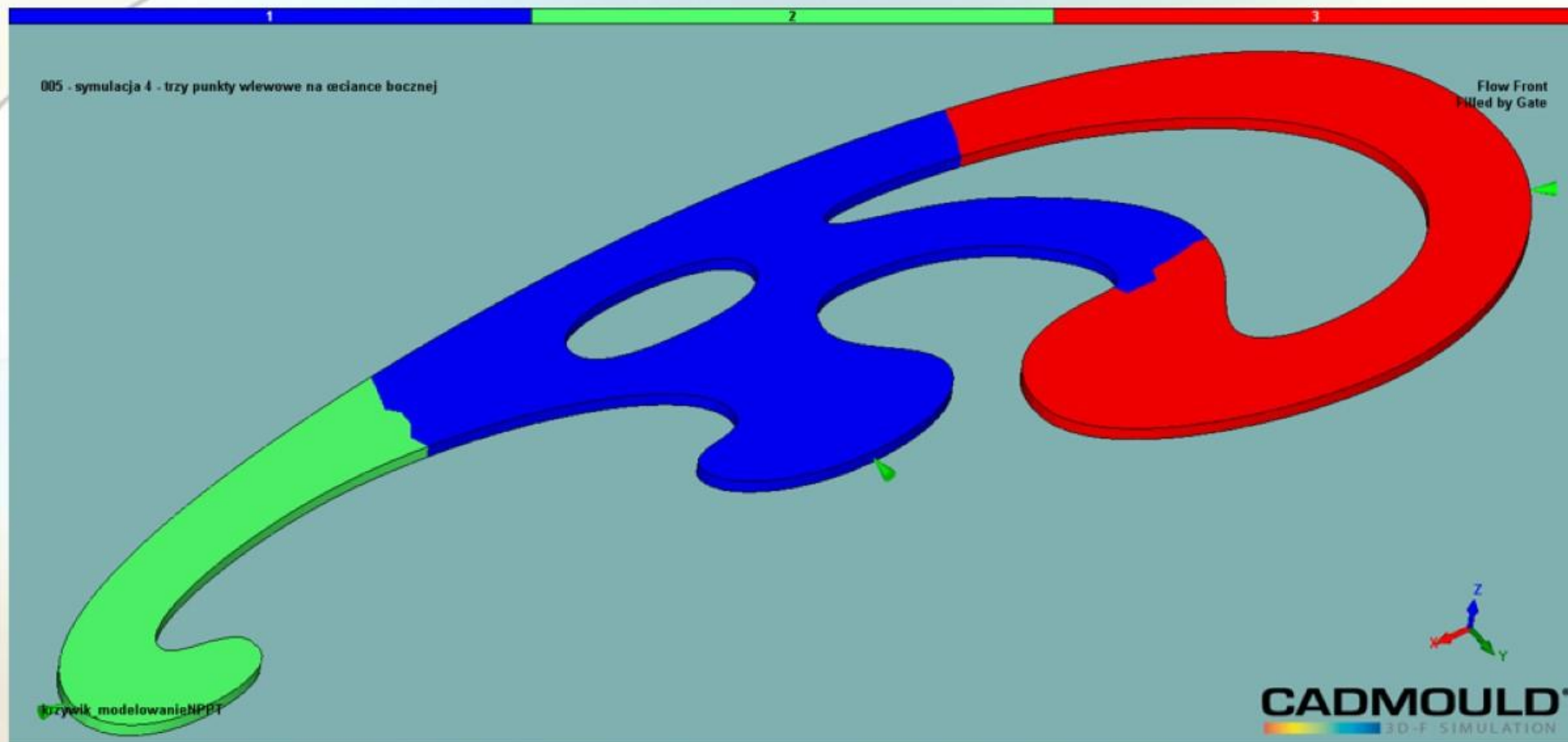
Flow Front > Time when filled
Wypełnienie gniazda formującego w funkcji czasu.





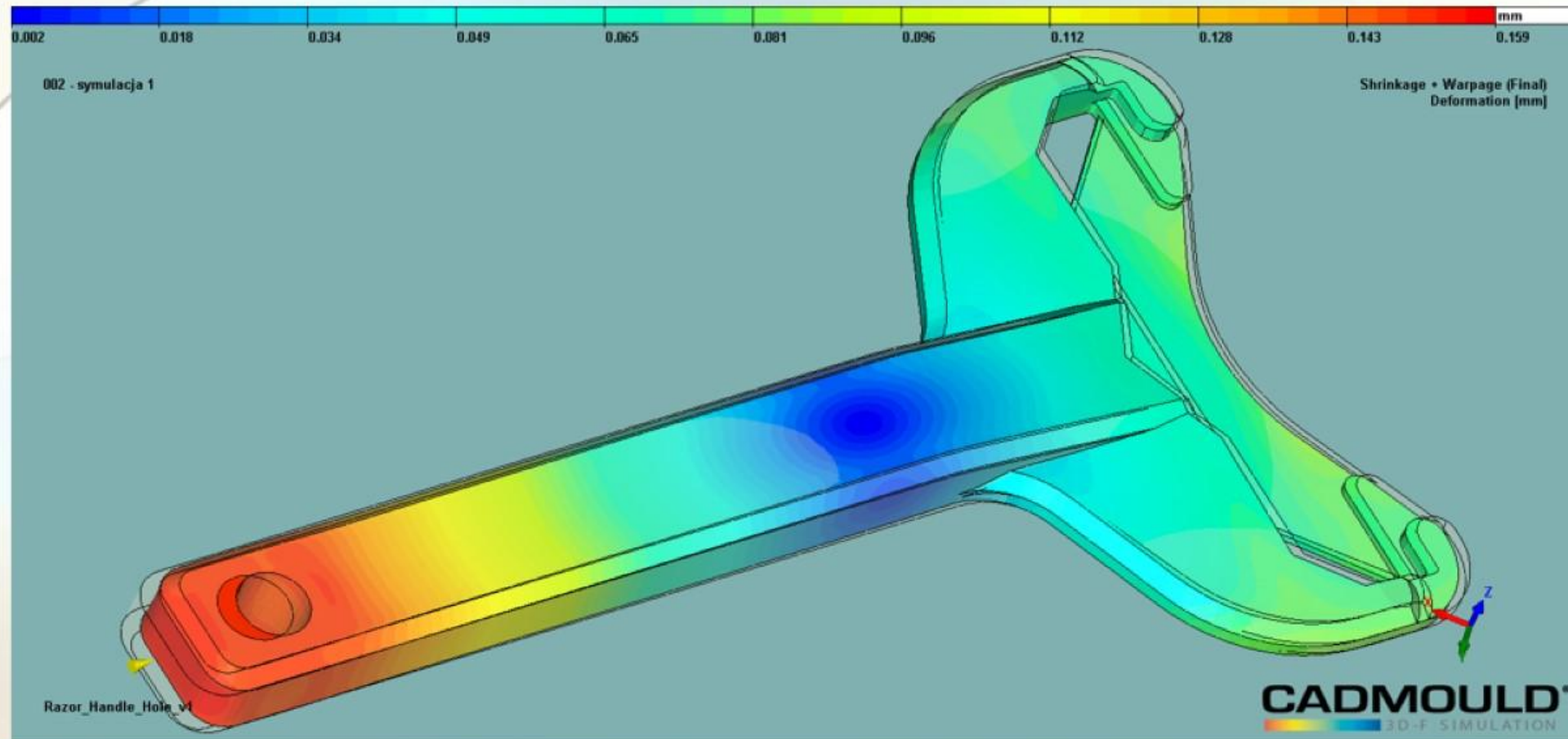
Flow Front > Temperature when filled
Zmiana temperatury tworzywa podczas wypełniania gniazda formującego.



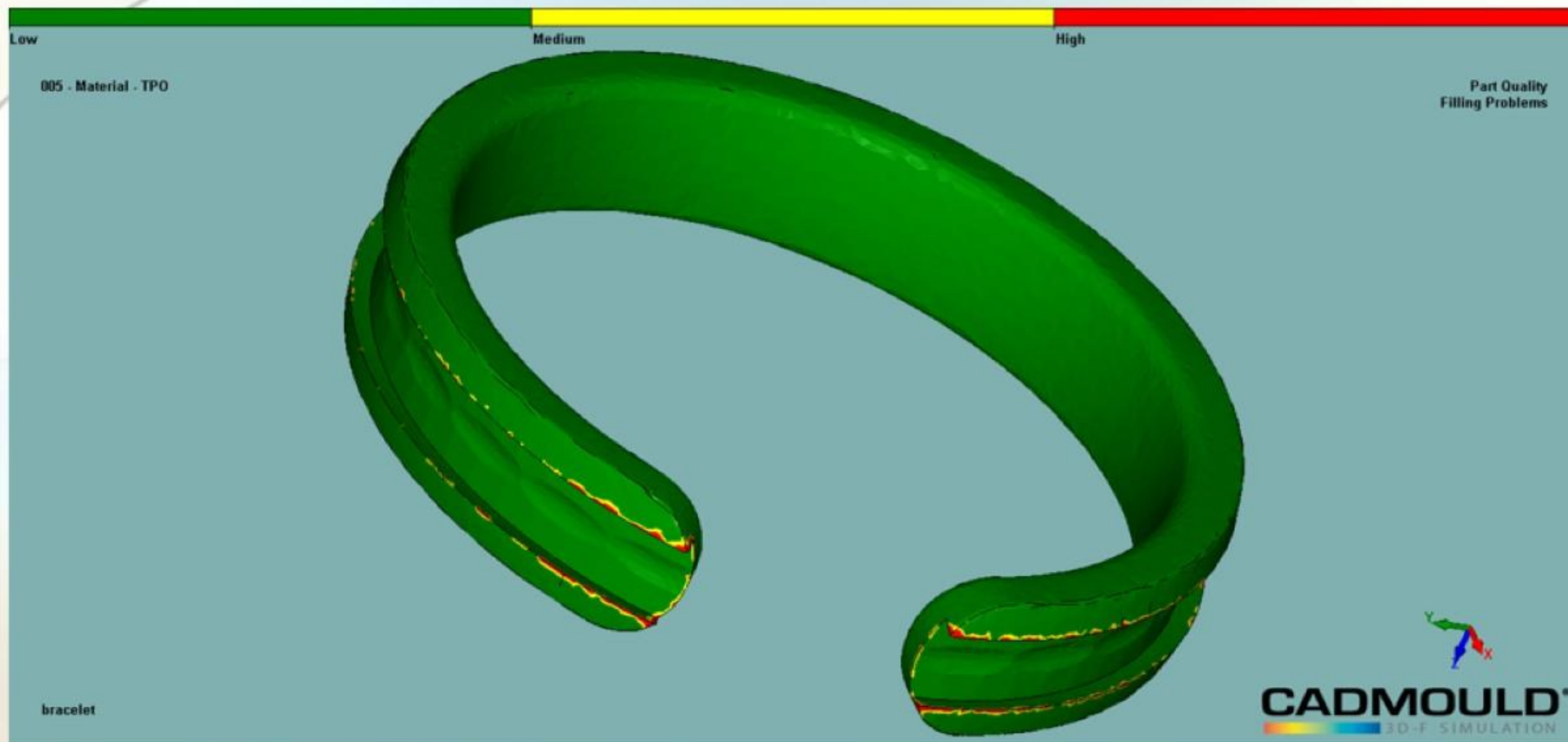


Flow Front > Filled by Gate
Udział wypełnienia gniazda formującego tworzywem przez poszczególne przewężki.





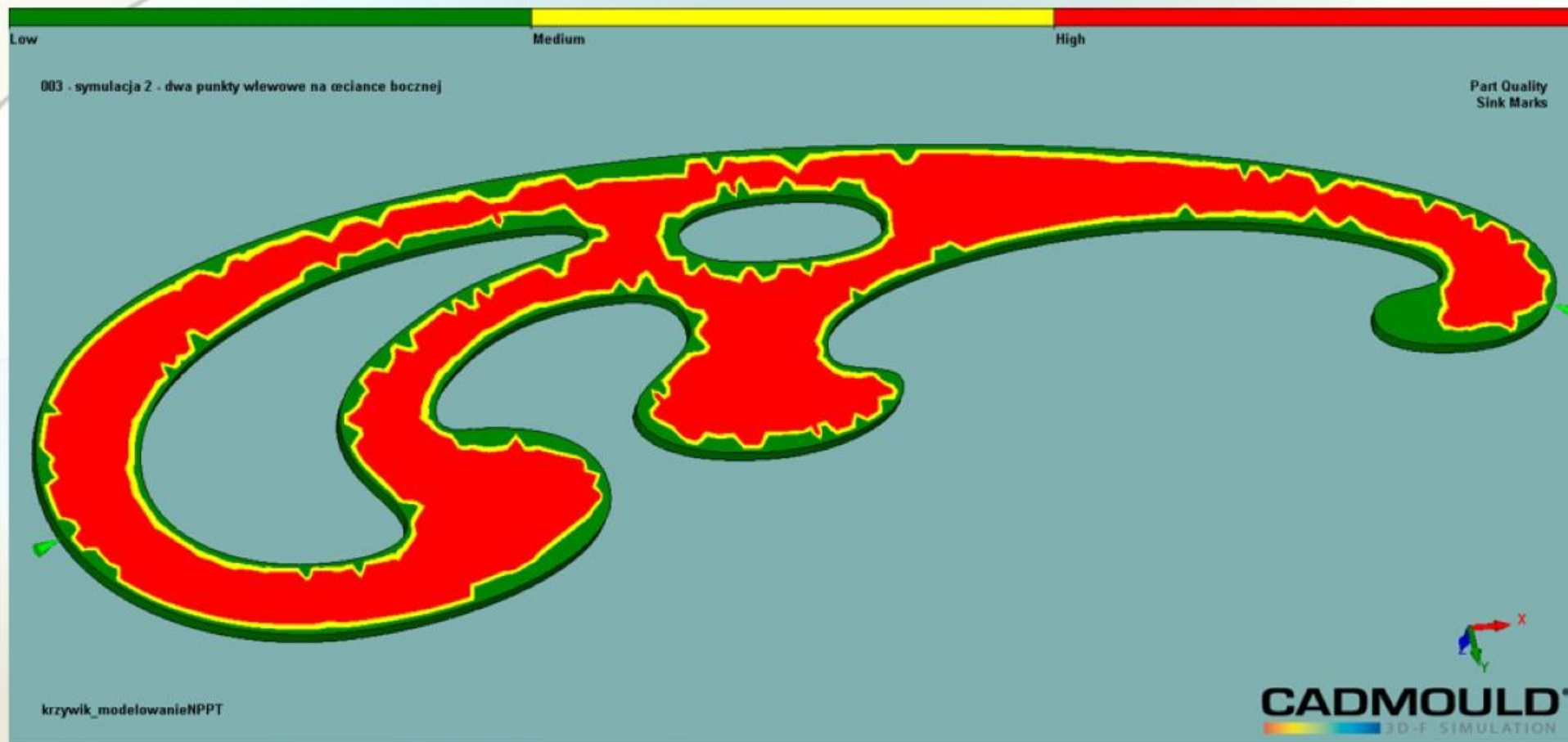
Wizualizacja różnic między kształtem ochłodzonej wypraski a kształtem gniazda formującego – pokazuje, w którą stronę zniekształca się wypraska. O ile skurcz jest zawsze „do środka”, to zniekształcenie może być w różnych kierunkach. Ta wizualizacja pokazuje, w którą stronę będzie wyginać się wypraska po wyjęciu z formy wtryskowej – a może to być w głąb gniazda albo poza jego obręb.



Part Quality > Filling Problems

Wynik symulacji pokazuje obszary, gdzie w różnym stopniu może pojawić się problem z wypełnieniem gniazda formującego tworzywem. Jeden z podstawowych wyników, wskazujący na to, czy analizowana wypraska będzie wykonana prawidłowo bez podstawowej wady, jaką są niedolewy.





Part Quality > Sink Marks

Wyniki symulacji wskazujące, w jakich obszarach wypraski wystąpią zapadnięcia powierzchni. Należy je zawsze oceniać w zestawieniu z wynikami analizy skurczu i deformacji, bo zapadnięcia mogą być na znacznej powierzchni, ale o wymiarach mieszczących się w polu tolerancji wymiarowej.



Dzięki symulacji komputerowej i analizie otrzymanych wyników już na etapie projektowania można wyeliminować wiele błędów **konstrukcyjnych** i **technologicznych**, dzięki temu znacząco **obniżając koszty** oraz **skracając czas** przygotowania produkcji.

W oparciu o wyniki symulacji można spełnić wymagania o charakterze **jakościowymi** i **ekonomicznym**, związane z otrzymaniem wypraski o wysokiej stabilności wymiarowej, dobrych właściwościach optycznych powierzchni oraz żądanej dokładności pasowania z innymi współpracującymi z nią częściami.



Korzyści ekonomiczne wynikające z zastosowania programów typu CAE w przetwórstwie tworzyw to przede wszystkim:

- redukcja ilości prototypów fizycznych form i gniazd formujących na potrzeby prób, a tym samym oszczędność materiałów, kosztów oraz czasu,**
- krótszy czas potrzebny na zweryfikowanie projektu wypraski,**
- optymalizacja czasu trwania cyklu wtryskowego,**
- minimalizacja siły zamknięcia formy poprzez optymalny dobór geometrii gniazda formującego, kanałów wlewowych oraz parametrów procesu.**



Wśród korzyści jakościowych należy przede wszystkim wymienić:

- możliwość zapobieganiu wadom wyprasek, poprzez eliminowanie źródeł ich powstawania na etapie symulacji,**
- możliwość zapobiegania łączeniu się linii frontów płynięcia tworzywa w miejscach newralgicznych z punktu widzenia wytrzymałości oraz jakości,**
- możliwość zapobiegania powstaniu pęcherzy powietrznych, poprzez odpowiednią geometrię wypraski,**
- możliwość doboru odpowiedniego tworzywa pod kątem parametrów procesu oraz geometrii gniazda formującego,**
- analiza skurczu oraz deformacji wypraski pod kątem zachowania narzuconej tolerancji wymiarowej.**



Wykorzystano materiały własne, materiały udostępnione przez firmy Simcon oraz ilustracje dostępne w bibliotece grafik Google pod hasłem „injection molding”

Pliki tworzące ścieżkę dźwiękową zostały pobrane na licencji Royalty Free Music, ze strony www.bensound.com.



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

Modelowanie numeryczne procesów przetwórstwa tworzyw

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Technologii i Przetwórstwa Tworzyw Polimerowych
dr inż. Tomasz Jachowicz

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

