

Dokładność geometryczna w CAD/CAM

Dr inż. ADAM ZALEWSKI

Każda część stosowana w przemyśle maszynowym jest wykonana z określoną dokładnością. Dokładność wykonania odniesiona do tolerancji wymiarów, kształtów i położenia jest podana w dokumentacji technicznej. Jeśli nie jest określona liczbą czy symbolem, przyjmuje się klasę dokładności wykonania zgodnie z zaleceniami w danym przedsiębiorstwie lub w odniesieniu do tzw. tolerancji warsztatowej (zwykle jest to 14. klasa dokładności). Nie ma wymiarów o zerowym polu tolerancji. Tolerancje wymiarów są szczególnie istotne tam, gdzie powierzchnie różnych części współpracują ze sobą. Dotychczas były to najczęściej elementy okrągłe i wtedy istotne było pasowanie wałka i otworu. Przypadek ten jest dobrze poznany; istnieje wiele sposobów efektywnego wytworzenia i pomiaru takiej pary.

Obecnie swoboda projektowania modeli 3D jest posunięta tak daleko, że wydaje się, że nie ma ograniczeń. Rosną również wymagania co do dokładności wykonywanych części. Coraz więcej zakładów, aby sprostać oczekiwaniom zleceńodawców, inwestuje w drogie maszyny pomiarowe. Technologia wykonania skomplikowanych modeli metodą obróbki skrawaniem musi nieustannie nadszekać za nowymi wyzwaniami. Nawet, jeśli dokładność wykonania części nie jest weryfikowana poprzez charakter pasowania, istotne jest prawidłowe położenie wybranych punktów modelu, lub kształt powierzchni swobodnych, który jest sprawdzany (np. przez odcisk barwionego wzorca lub zmianę kąta odbijających się promieni świetlnych względem przemieszczającego się obserwatora). Błędy geometryczne mogą mieć wiele przyczyn. Analizując wykonany prototyp warto zastanowić się dlaczego wystąpiły różnice między teoretycznymi założeniami a realizacją praktyczną.

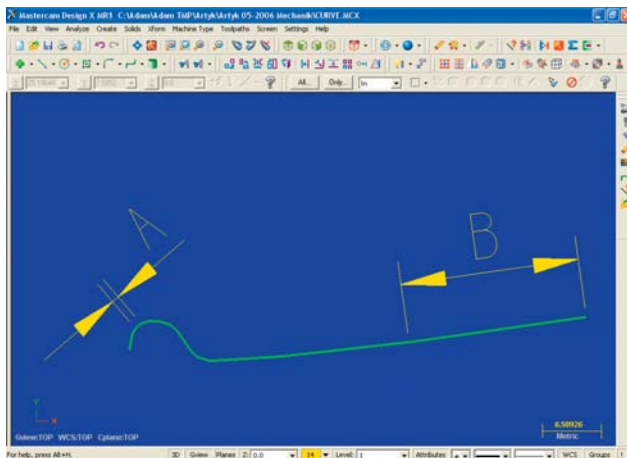
Przykładowe problemy z modelowaniem CAD

Wszystkie programy komputerowego wspomaganie projektowania (*Computer Aided Design – CAD*) pracują z określoną dokładnością. Jest ona reprezentowana przede wszystkim przez parametr definiujący tolerancję systemu, dostępny zwykle z poziomu konfiguracji programu. Tolerancja systemu wyznacza precyzję obliczeń, która np. dla najbardziej popularnego na świecie (dane CIM-data 2005), zintegrowanego programu CAD/CAM – Mastercam X, ustawiona jest domyślnie na wartości 0,00005. Oznacza ona w tym przypadku minimalną odległość między dwoma elementami, przy jakiej będą one jeszcze rozpatrywane przez program jako oddzielne obiekty. Tolerancja systemu nie jest w tym przypadku odniesiona do konkretnych jednostek (cale lub mm); można ją zmieniać w zależności od potrzeb. Zmiana tolerancji dokładności obliczeń będzie miała wpływ na szybkość pracy programu. Zmniejszenie tolerancji systemu (czyli zwiększenie jego dokładności) spowoduje wydłużenie czasu obliczeń i tym samym spowolnienie pracy programu. Porównując różne środowiska CAD warto więc zwrócić uwagę na dokładność tworzonych przez nie modeli.

Tolerancja systemu to pierwszy parametr. Poddając analizie kolejne atrybuty pracy systemu CAD (ponieważ jest to zagadnienie ogólne, wygodnie jest śledzić temat w jednym środowisku np. Mastercam X, gdyż wprowadzanie dodatkowego nazewnictwa występującego w innych programach może zaciemnić obraz wzajemnie powiązanych, różnych typów tolerancji), użytkownik uzyska

wartości, którymi można przykładowo określić precyzję tworzenia elementów takich, jak np. krzywe:

- *curve minimum step size* (minimalny krok analizy wzdłuż krzywej) – standardowo ustawiony na poziomie 0,02. Parametr ten określa najmniejszą odległość między punktami obliczeniowymi wzdłuż krzywej (odległość A na rys. 1);



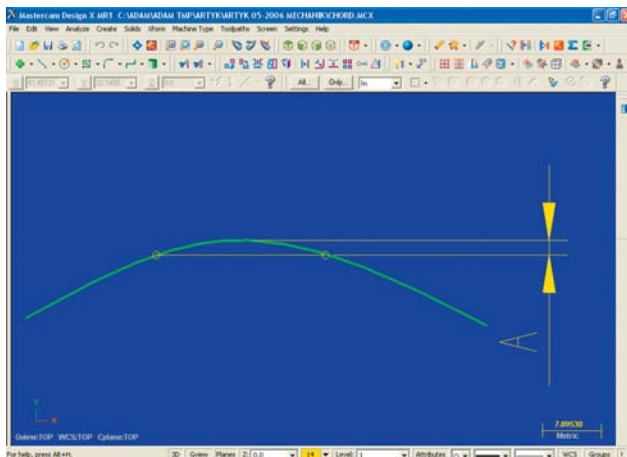
Rys. 1. Definiowanie wielkości kroku analizy wzdłuż krzywej

- *curve maximum step size* (zwykle jest to 100,0) – definiuje maksymalny krok analizy wzdłuż krzywej. Przy konstruowaniu za pomocą krzywych np. elementów prostoliniowych, kolejne punkty obliczeniowe będą w odległości nie większej niż 100 jednostek (odległość B na rys. 1);

- *curve chordal deviation*, który określa maksymalną odległość krzywej od odcinka łączącego dwa leżące na niej punkty obliczeniowe (odległość A na rys. 2, tzw. błąd na cięciwie). Im odległość ta jest mniejsza, tym więcej jest tych odcinków, a opis krzywej jest dokładniejszy.

Krzywe mają duży wpływ na dokładność projektu: najpierw – kiedy stanowią samodzielne obiekty, i potem – gdy rozpinane są na nich powierzchnie i stanowią wyjściową geometrię do tworzenia i modyfikacji brył.

Zmniejszona wartość pola tolerancji może okazać się niekorzystna. Objawia się to szczególnie podczas analiz modeli geometrycznych pod kątem ich wykonania (CAM),



Rys. 2. Określenie maksymalnego tzw. błędu na cięciwie wzdłuż krzywej

czy w trakcie importu danych zapisanych w obcym formacie. Zbyt mała wartość tolerancji krzywych, może spowodować wykrycie braku połączenia między kolejnymi fragmentami konturu. Utrudnia to wykorzystanie go do dalszych operacji modelowania lub obróbki CAM mimo, że precyzja konturu jest wystarczająca z poziomu wymagań dokładnościowych projektu. Twórcy programów CAD/CAM dostarczają specjalne funkcje wspomagające rozwiązanie takich problemów. Np. Mastercam X daje możliwość wykorzystania chwilowej zmiany tolerancji analizy łączenia elementów typu krzywe, łuki, proste i punkty do współpracy z pomocniczymi obiektami typu *chains* (łańcuchy). Jednym z efektów działania tej funkcji pomocniczej (*chain options* – konfiguracja łańcucha) będzie możliwość użycia do obróbki CAM łańcucha stworzonego z obiektów, których odległości między punktami końcowymi są znaczne (nawet kilkadziesiąt milimetrów), ale nie mają one wpływu na dokładność wykonania części.

W Mastercam X jednym parametrem jest modelowanie powierzchniowe tolerowane. *Maximum surface deviation* (domyślnie wynosi on 0,02) określa maksymalny dystans między tworzoną powierzchnią i konturem ją definiującym.

Przy analizie brył zwraca uwagę parametr *Edge tolerance* (w Mastercam X domyślnie ustawiony na wartości 0,075), który używany jest podczas zamiany powierzchni na bryłę i określa największą odległość między krawędziami powierzchni, które są „zszywane” w bryłę. Jeżeli odległość ta będzie większa, powstanie np. element cienkościenny (nawet o zerowej grubości ścian) zamiast bryły (o określonej objętości). Teoretyczna, największa dokładność dla modelowania bryłowego (opartego w Mastercam X na jądrze Parasolids) wynosi 0,000001. W praktyce jest ona zmniejszona do tolerancji systemu (domyślnie 0,00005).

Na rys. 3 pokazano przykład przekształcenia modelu powierzchniowego (kolor zielony) na bryłę (kolor czerwony) i ponownej zamiany bryły na powierzchnie (kolor błękitny). Widoczne zmiany koloru częściowo wynikają z nakładania się barw pokrywających się obiektów, ale są też fragmenty modelu (np. zaokrąglone pasy zielono-czerwone), gdzie barwy zachowują kolejność stabilnie, niezależnie od punktu widzenia obserwatora. W tych częściach uwidaczniają się wyraźnie błędy geometryczne powierzchni, wynikające z podwójnego przekształcenia powierzchni w bryły i brył w powierzchnie (rys. 3).

Dąży się do tego, aby komputerowy zapis konstrukcji (model CAD) powstał tylko raz, na etapie projektowania. Później może być on analizowany, modyfikowany itd. (co może stanowić około 80% czasu „życia” modelu).

Błąd lub niedokładność popełnione przy projektowaniu (np. uchwycenie końca krzywej w innym punkcie niż właściwy), są trudne do wychwycenia i mogą dać się zauważyć dopiero na etapie produkcji. Podobnie, stosowanie na etapie projektowania zbyt dużych parametrów tolerancji geometrycznej może skutkować przekłamaniami po zaimportowaniu danych do innego programu CAD lub CAM.

Praktyczne podejście do problemu tolerowania w systemie CAD/CAM, można wymienić w punktach:

- każdy obiekt geometryczny w programie CAD jest tolerowany, a więc obciążony błędem;
- projekt 2D/3D powinien być wykonany możliwie najdokładniej (zawsze 1:1), ale z uwzględnieniem realnych wymagań produkcji;
- małe wartości parametrów tolerancji zwiększają dokładność obiektów geometrycznych, ale przy imporcie i modyfikacji danych mogą spowodować utratę połączenia między elementami;
- duże wartości parametrów tolerancji przyspieszają analizę i dają szansę na eliminowanie trudności z łączeniem obiektów, ale mogą być przyczyną błędów wykonania.

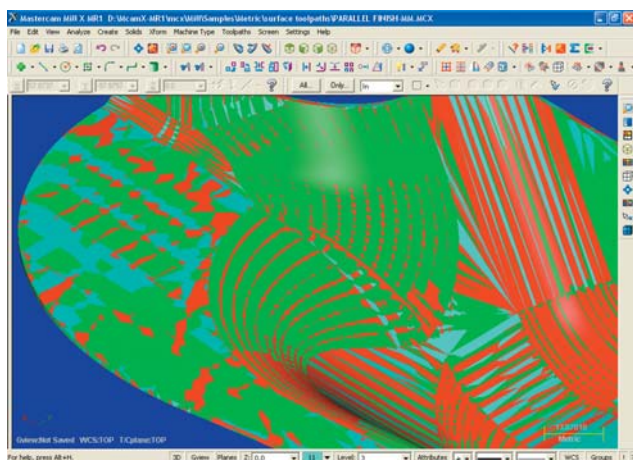
Już w fazie projektowania modelu pojawiają się więc błędy kształtu lub wymiaru, które mogą mieć znaczący wpływ na wykonanie zlecenia. Osobnym problemem jest wymiana danych między systemami CAx. Dokładność modelu ma największe znaczenie podczas przejścia do fazy wytwarzania na obrabiarkach sterowanych numerycznie (CAD/CAM). Funkcjonuje w nich wiele formatów wymiany danych, co już samo w sobie oznacza, że nie ma rozwiązania najlepszego i uniwersalnego, choć prace nad takim formatem trwają od lat (np. coraz bardziej popularny format STEP).

CAM i tolerancja wykonania

Często wykonanie zlecenia zaczyna się od importu danych z innego systemu CAD. Zasadniczym problemem jest wybór najlepszego formatu do wymiany danych. Jedną z możliwości jest bezpośrednie wczytanie danych z danego programu CAD do systemu CAM (jeśli oba środowiska są dostarczane przez jednego producenta, lub producenci są związani umową współpracy w tym zakresie). Jest to godne polecenia, jednak zwykle nie spełnia wszystkich potrzeb przedsiębiorstwa dotyczących wymiany danych w postaci elektronicznej.

W pozostałych przypadkach są dostępne formaty uniwersalne (STEP, IGES czy Parasolid lub inne) związane z producentami konkretnych rozwiązań CAD (DWG, DXF, SAT, VDA czy nawet STL lub ASCII). Każdy z nich zamienia dane źródłowe na własny format z zadaną tolerancją, która czasem podana jest w nagłówku pliku. Tolerancja dla np. formatu IGES może wynosić 0,045.

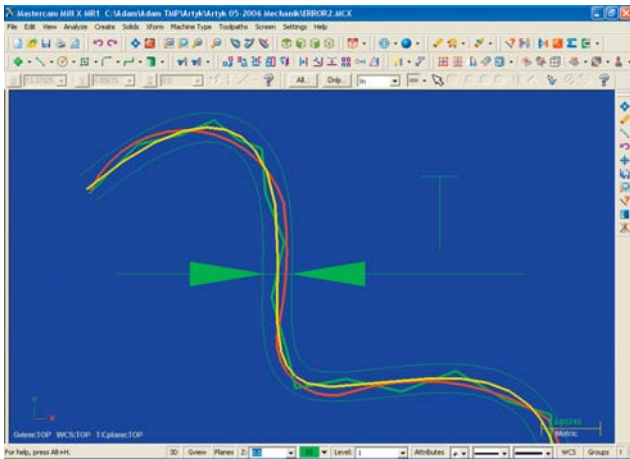
Importując dane można pozbyć się elementów nieistotnych dla wykonania zlecenia poprzez filtrowanie danych (zabieg umożliwia czasem dotarcie do danych geometrycznych, które mogły być blokowane przez wadliwe lub nierozpoznane przez program CAD/CAM obiekty). Kolejne działanie dotyczy automatycznej naprawy modelu (tzw. zszywanie powierzchni lub ścian bryły). W tym przypadku wpływ wielkości tolerancji jest bardzo wyraźny. Manewrując parametrami można uzyskać raz jedną bryłę, a raz zestaw obiektów. Następne narzędzia umożliwiają wyszukanie potencjalnych błędów w zaimportowanych danych (np. nieciągłości brył, nieprawidłowe przecinanie się powierzchni), oznaczenie ich w systemie, ewentualną naprawę lub automatyczne utworzenie w tym miejscu geometrii pomocniczej. Po przejściu tej procedury model jest gotowy do tworzenia programów na obrabiarki CNC.



Rys. 3. Porównanie teoretycznie takich samych modeli powierzchniowych (kolor zielony i błękitny) oraz bryły (kolor czerwony)

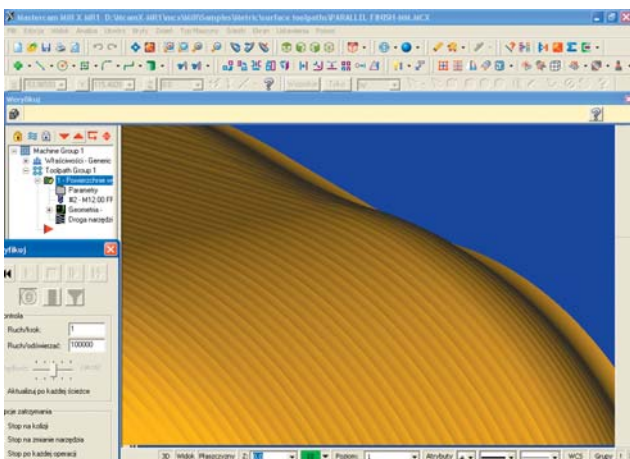
Na tym etapie pojawiają się kolejne wartości tolerancji związane z przygotowaniem ścieżki narzędzia w oparciu o dane 2D/3D zlecenia.

Tor ruchu narzędzia jest wyznaczany początkowo w postaci punktów określających kolejne położenia narzędzia (rys. 4). Realizacja obróbki w oparciu o takie dane

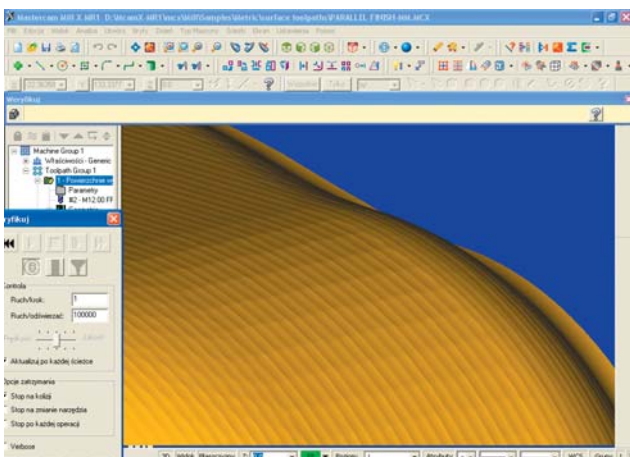


Rys. 4. Tolerancja wykonania T: zarys modelu – kolor żółty, interpolacja odcinkowa – kolor zielony, interpolacja kołowa – kolor czerwony

wydłuża znacząco program NC oraz może prowadzić do pogorszenia jakości powierzchni (rys. 5). Dlatego polecane jest stosowanie interpolacji liniowej i kołowej (tzw. filtrowanie) tak często, jak to jest możliwe (rys. 6). Łuki



Rys. 5. Widoczne załamania powierzchni na skutek stosowania interpolacji odcinkowej



Rys. 6. Polepszenie jakości powierzchni przy użyciu interpolacji kołowej

powstają w poszczególnych płaszczyznach roboczych (XY, YZ lub XZ) oraz w dowolnej ich kombinacji. Ograniczeniem jest zdefiniowanie największego i najmniejszego łuku opisanego przez blok programu NC. Duże łuki skracają program NC. Powstają one w oparciu o krzywiznę i tolerancję powierzchni. Tworzenie małych łuków będzie związane z krzywizną powierzchni i geometrią narzędzia. Stosowanie w programie NC zbyt małych promieni może skomplikować tor narzędzia poprzez wielką liczbę małych łuków i spowodować niebezpieczeństwo mało łagodnych przejść między nimi.

W programie Mastercam X teoretyczna tolerancja wykonania jest sumą tolerancji przygotowania ścieżki narzędzia oraz tolerancji filtrowania ścieżki (zamiany interpolacji odcinkowej na liniową i łukową). Między tymi parametrami zalecana jest relacja 1:2. Deklarując tolerancję ścieżki (np. 0,01, Mastercam X) automatycznie wyznaczy tolerancję filtrowania ścieżki narzędzia na poziomie 0,02 a łączną, teoretyczną tolerancję wykonania ustali na 0,03. Parametry te można deklarować dowolnie, ale zalecenia producenta odzwierciedlają doświadczenia wielu zakładów produkcyjnych i dlatego warto wziąć je pod uwagę.

Z kolei parametr *The look ahead* (patrz w przód) określa jak wiele analizowanych punktów Mastercam będzie łączył podczas interpolacji. Wielkość parametru jest związana z kształtem ścieżki narzędzia. Np. jeśli liniowy ruch narzędzia składa się ze 100 oddzielnych bloków, a *look ahead* wynosi 10, wtedy program utworzy 10 oddzielnych bloków w programie NC. Jeśli natomiast *look ahead* wynosi 50, to utworzone zostaną tylko 2 bloki. Mniejsza wartość *look ahead* ogranicza liczbę bloków danych, które mogą być zamienione w jeden ruch. Duża wartość *look ahead* z kolei powoduje krótszy opis ścieżki narzędzia, ale wydłuża czas obliczeń. Można ten parametr ustawić na wartość nieograniczoną. To samo podejście jest stosowane przy filtrowaniu ruchów po łuku. W następnej kolejności pojawiają się parametry tolerowania przekształceń ścieżki narzędzia przez postprocesor na format kodu NC konkretnej obrabiarki.

*

Nowoczesne systemy CAD/CAM dają gotowe, praktyczne rozwiązania dotyczące tolerowania modeli geometrycznych i opracowania na ich podstawie programów na obrabiarki CNC. Warto pamiętać o możliwościach pojawienia się błędów geometrycznych jeszcze na etapie projektowania i przetwarzania danych CAD/CAM/CNC, chociaż – statystycznie rzecz biorąc – problem dokładności wykonania dopiero się zaczyna. Kierując zlecenie do wykonania na konkretnej obrabiarkie należy pamiętać o ewentualnych błędach, które mogą się pojawić w związku z jej: określoną dokładnością geometryczną (np. zużyte prowadnice), dokładnością kinematyczną, dokładnością ustawczą i pozycjonowania narzędzia względem przedmiotu obrabianego, dokładnością wymiany narzędzia (offset średnicy, długości), zużyciem narzędzia, ograniczoną sztywnością statyczną i dynamiczną, odpornością na odkształcenia cieplne, odpornością na drgania itd.

Czy można zatem wykonać przedmiot dokładnie? Codzienna praktyka zakładów produkcyjnych pokazuje, że tak. Dokładnie tzn. zgodnie z wymaganiami określonymi w dokumentacji technicznej oraz z efektami ekonomicznymi. Jedną z korzyści stosowania profesjonalnych systemów CAD/CAM jest świadome i skuteczne uwzględnianie wielkości tolerancji modelu i tworzenia ścieżki narzędzia na każdym etapie realizacji zlecenia produkcyjnego.