

# Obróbka cieplna stali narzędziowych w piecach próżniowych z hartowaniem gazowym (cz. 1)

**Wymagania, symulacje i kontrola procesu pozwalają uzyskać właściwą strukturę materiału.**

Emilia WOŁOWIEC, Piotr KULA, Maciej KORECKI, Józef OLEJNIK



## W KILKU SŁOWACH

*Stale narzędziowe stanowią podstawowy materiał do formowania wszystkich grup materiałów do produkcji narzędzi. Prawdopodobnie zaprojektowany i kontrolowany proces chłodzenia ma zasadnicze znaczenie dla efektu końcowego obróbki cieplnej elementu, a tym samym na jego trwałość i przydatność użytkową. Nowoczesne urządzenia i technologie obróbki cieplnej umożliwiają wielkoseryjną i skuteczną obróbkę cieplną stali narzędziowych, natomiast symulatory takie jak G-Quench Pro® umożliwiają tworzenie nowych metod obróbki przy równoczesnym zmniejszeniu czasochłonnych procesów testowych.*

**S**tale narzędziowe są szeroko stosowanym materiałem do kształtowania narzędzi z metali, polimerów, ceramik i kompozytów, przy czym nadawanie kształtu może odbywać się na drodze obróbki skrawaniem lub przeróbki plastycznej. Ponieważ zasadniczym wymaganym stawianym narzędziu jest stałość kształtu, oczekuje się, że materiał z którego został wykonany, będzie zniósł obciążenia bez odkształceń plastycznych oraz będzie wykazywał dużą odporność na ścieranie.

Stale narzędziowe klasyfikuje się ze względu na zastosowania. Matryce, stemple, tłoczniaki, rolki do prasowania i inne elementy do obróbki elementów nie nagrzanych wykonywane są ze stali stopowych do pracy na zimno, takich jak NCLV, NC10, NC11LV, NZ3 (jakkolwiek w praktyce zarówno materiał jak i narzędzia

ulegają nieznacznemu nagrzewaniu podczas pracy, chociażby na skutek tarcia lub pracy odkształcającej). Wielkogabarytowe matryce do wyciskania, formy do odlewania ciśnieniowego, trzpienie, przebijaki oraz inne elementy do przeróbki plastycznej innych materiałów ogrzanych do wyższych temperatur (w zakresie 250-700°C) wykonuje się ze stali stopowych do pracy na gorąco (takich jak WCL, WCLV, WNLV, itp.). Od tej grupy materiałów oczekuje się przede wszystkim dużej twardości, odporności na ścieranie, uderzenia i dobrej hartowności. Trzecią grupę stanowią stale szybko tnące (np. SW7M, SW18, SK5M), stosowane głównie do skrawania metali z dużymi szybkościami (noże, wiertła, frezy).

Uogólniając, wszystkie poprawnie zahartowane stale narzędziowe charakteryzują się wysoką twardością, odpornością na ścieranie, niewielką odkształcalnością i małą wrażliwością na przegrzanie. Ponieważ zasadnicze cechy tych stali (odporność na zużycie ściernie, wytrzymałość, odporność na pękanie, ciągliwość) silnie zależą od osiągniętej twardości, wiele uwagi zwraca się właśnie na ten parametr. Właściwe prowadzenie procesu hartowania ma istotne znaczenie dla końcowej twardości elementów, a tym samym decyduje o ich przydatności eksploatacyjnej.

## Obróbka cieplna stali narzędziowych

Na obróbkę cieplną stali narzędziowych składa się zabieg hartowania i bezpośrednio następujący po nim zabieg odpuszczania, co pozwala uzyskać właściwą strukturę materiału. Należy wspomnieć, że na własności tych materiałów znaczący

wpływ mają ich odpowiednio dobrany skład chemiczny, co jednak nie będzie szerzej omawiane w niniejszym artykule. Stale narzędziowe wymagają precyzyjnego traktowania, w większości indywidualnego dla każdego z gatunków. Szczegółowe wytyczne określa literatura fachowa i karty materiałowych producentów a nowe koncepcje oraz trendy w obróbce dyskutowane są w ramach czasopism i wydarzeń branżowych [1-4]. Jednakże w obrębie grup zastosowań tych stali występują pewne podobieństwa.

Podczas hartowania stali narzędziowych do pracy na zimno potrzebne jest zapewnienie stali drobnoziarnistości oraz odporności na ścieranie i zużycie. Własności te osiąga się tak prowadząc proces, aby w strukturze materiału pozostała pewna część węglików nie rozpuszczonych w austenicie. Dlatego w praktyce hartuje się je w oleju z temperatur w zakresie do 960°C.

Stale do pracy na gorąco hartuje się w oleju lub w gazie z temperatur do 1120°C a następnie odpuszcza w zakresie do 600°C. Temperatura austenitacji jest kompromisem pomiędzy koniecznością ograniczenia rozrostu ziaren austenitu pierwotnego, a potrzebą rozpuszczenia węglików stopowych. W zależności od wielkości narzędzi podczas hartowania dąży się do osiągnięcia struktury martenzytu (mniejsze elementy) lub martenzytu z bainitem (większe narzędzia). Następnie stosuje się dwukrotne odpuszczanie w temperaturze lub powyżej efektu twardości wtórnej, w celu redukcji austenitu szczytkowego, zwiększenia ciągliwości oraz odporności na zmęczenie cieplne. Niekiedy wprowadza się dodatkowe procesy, takie jak nakładanie różnicowanych powłok (CVD, PVD) lub azotowanie, które dodatkowo utwardzają powierzchnię roboczą narzędzi oraz poprawiają ich odporność na ścieranie i korozję.

Stale szybko tnące są hartowane w oleju lub gazie pod ciśnieniem, z temperatur do 1250°C a następnie odpuszczane w zakresie 500-600°C.

Poprawnie wykonana obróbka cieplna decyduje o własnościach mechanicznych i użytkowych narzędzi oraz ekonomii ich stosowania. Dopuszczenie nieprawidłowości prowadzi do szybszego zużycia, deformacji lub uszkodzenia eksploatowanych elementów, a w skrajnym przypadku nawet ich zniszczenia (pęknięcia) już w czasie obróbki cieplnej, powodując wymierne straty finansowe. Oczywiście,

nie bez znaczenia jest odpowiednia jakość i stan materiału wyjściowego.

Trudności w zapewnieniu jakości wielkogabarytowych narzędzi (form i matryc) doprowadziły do powstania standardów ich obróbki. Najbardziej znane opracowania w tym zakresie zostały wydane przez amerykańskie stowarzyszenie NADCA (North American Die Casting Association) [5] oraz liderów przemysłu samochodowego m. in. koncerny Ford [6], General Motors [7]. Standardy dotyczą przede wszystkim stali H13 (WCLV) i jej modyfikacji: nawiązują do kontroli jakości stanu materiału wyjściowego, wytycznych w zakresie prowadzenia i kontrolowania procesu obróbki cieplnej oraz badań wyników.

### Wytyczne do OC stali narzędziowych do pracy na gorąco wg NADCA

Według wytycznych NADCA proces obróbki cieplnej należy prowadzić w piecu próżniowym z hartowaniem w gazie pod wysokim ciśnieniem, monitorując i kontrolując temperaturę na powierzchni i w rdzeniu obrabianej części (dla termopar wsadowych ustalone są ściśle określone lokalizacje).

Nagrzewanie do temperatury austenitacji prowadzi się stopniowo, nie dopuszczając do zbyt dużej różnicy temperatur. Pierwszy przystanek następuje w temperaturze ok. 650°C i trwa do chwili, aż różnica temperatur między rdzeniem i powierzchnią będzie mniejsza niż 110°C (w praktyce dużo mniej). Kolejny przystanek ustala się w temperaturze 850°C i trwa do wyrównania temperatur, z różnicą nie przekraczającą 14°C. Ostatecznie osiągnięta jest temperatura austenitacji 1030°C, w której następuje wygrzewanie przez czas 30 min od chwili wyrównania temperatur (przy dopuszczalnej różnicy temperatur poniżej 14°C), lub przez maksymalnie 90 min od osiągnięcia temperatury 1030°C na powierzchni. Zalecenia te ograniczają deformacje termiczne jak również nadmierny rozrost ziarna austenitu.

Matryce hartuje się, chłodząc je z maksymalną szybkością do osiągnięcia temperatury 150°C w rdzeniu. Średnia szybkość chłodzenia powierzchni do 540°C powinna wynosić co najmniej 28°C/min. W przypadku dużych matryc (przy przekrojach powyżej 300 mm), stosuje się

chłodzenie izotermiczne w temperaturze powierzchni 400-450°C, w przypadku kiedy temperatura rdzenia odstaje o ponad 100°C. Przystanek izotermiczny zostaje zakończony, gdy wystąpi jeden z poniższych warunków:

- temperatura rdzenia różni się od temperatury powierzchni o mniej niż 100°C,
- temperatura powierzchni spadła poniżej 400°C,
- od rozpoczęcia przystanku izotermicznego minęło 30 min.

Chłodzenie jest kontynuowane do osiągnięcia 50°C w rdzeniu, po czym natychmiast po nim następuje odpuszczanie. Nie należy schładzać elementów poniżej temperatury 33°C. Wymagana szybkość chłodzenia jest istotna ze względu na ryzyko zbyt dużego wydzielenia węglików po granicach ziaren, skutkujące gorszą udarnością. Izotermiczne chłodzenie ogranicza różnicę temperatur powierzchni i rdzenia, przez co zmniejsza naprężenia i deformacje, chroni detal przed pęknięciem i jednocześnie nie dopuszcza do powstania struktury perlitycznej.



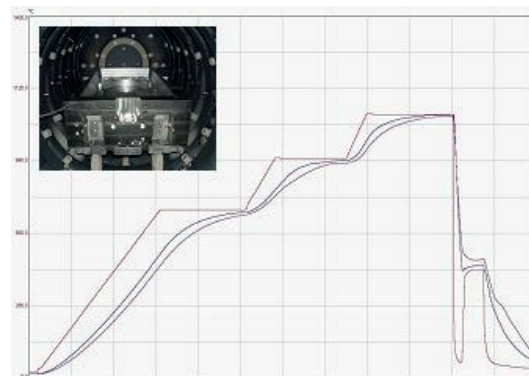
Rys. 1. Poziomy piec próżniowy typu 15.0 VPT (Seco/Warwick)

Pierwsze odpuszczanie prowadzi się w temperaturze minimum 565°C, wytrzymując przez czas zależny od przekroju narzędzia (1h/25 mm), lecz nie krócej niż przez 2 h. Dalej następuje chłodzenie do temperatury otoczenia i drugie odpuszczanie w temperaturze nie mniejszej niż 550°C. Trzecie odpuszczanie nie jest konieczne i jest stosowane jedynie do ostatecznej korekty twardości. Procesy odpuszczania zmniejszają wewnętrzne naprężenia, zapewniają stabilność wymiarową oraz właściwą strukturę i wymagają twardość, zwykle w zakresie 42-52 HRC.

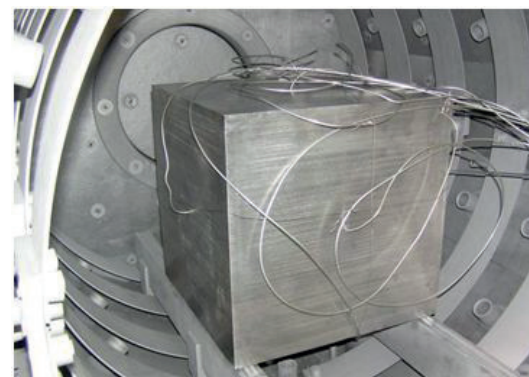
#### Piec próżniowy z hartowaniem gazowym

Wymagania stawiane przez NADCA dotyczące obróbki cieplnej form i matryc są możliwe do

zrealizowania w jednokomorowym piecu próżniowym wyposażonym w system chłodzenia w gazie obojętnym pod wysokim ciśnieniem (typu HPGQ) [8-13]. Krajowa firma Seco/Warwick opracowała typoszereg pieców 15.0 VPT specjalnie dedykowanych do obróbki cieplnej narzędzi, które spełniają najostrejsze wymagania tej branży i są dostarczane do odbiorców na całym świecie (w krajach europejskich, USA, Kanadzie, Meksyku, Brazylii, Chinach, Indiach, a nawet w Australii). Dostępne są piece różnej wielkości przestrzeni roboczej od 400/400/600 poprzez 600/600/900, 900/800/1200, 1200/1200/1800 mm i większe, z poziomym i pionowym załadunkiem wsadu (rys.1.).



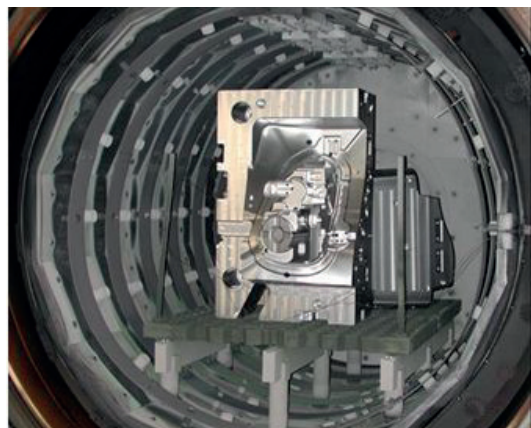
Rys. 2. Przebieg procesu austenizacji i hartowania z przystankiem izotermicznym, z monitoringiem temperatury pieca oraz powierzchni i rdzenia matrycy.



Rys. 3. Próba szybkości chłodzenia wg NADCA na referencyjnym bloku stalowym o wymiarach 400/400/400 mm.

Piece posiadają kompaktową budowę i ze względu na brak emisji zanieczyszczeń i innych uciążliwych czynników, mogą być instalowane i eksploatowane w czystych pomieszczeniach. Wyposażone są w grafitową komorę grzewczą umożliwiającą nagrzewanie wsadu do maksymalnej temperatury 1300°C z równomiernością +/- 5°C i lepszą. Umożliwiają to dookoła rozmieszczone elementy grzejne pracujące radiacyjnie

w próżni oraz w gazie obojętnym (w konwekcji, system ConFlap) dzięki czemu zapewnione jest skuteczne i równomierne grzanie również w niskich temperaturach. Piec hartuje w gazie obojętnym pod wysokim ciśnieniem (15 atm), którego cyrkulację w obiegu zamkniętym wymusza dmuchawa. Gaz chłodzący kierowany jest przez dysze rozmieszczone dookolnie bezpośrednio na wsad, skąd ciepło jest odbierane i przekazywane do wewnętrznego wymiennika ciepła. System chłodzenia umożliwia realizację procesów hartowania izotermicznego, regulując intensywność chłodzenia wydajnością dmuchawy i ciśnieniem gazu (rys.2.). Skuteczność chłodzenia gazowego pieców 15.0 VPT została potwierdzona testami na referencyjnym bloku stalowym o wymiarach 400/400/400 mm (rys.3.) uzyskując prędkości od 40 – 80 °C/min (dla wymaganych przez NADCA – 28°C/min i GM – 39°C/min).



Rys.4. Matryca w komorze pieca próżniowego po kompleksowej obróbce cieplnej.

Piec próżniowy umożliwia przeprowadzenie całego procesu w jednym urządzeniu, bez przemieszczania wsadu, w jednym cyklu roboczym, realizując kolejno: nagrzewanie do austenitacji, hartowanie izotermiczne, wielokrotne odpuszczanie i również azotowanie. Proces może być monitorowany poprzez termopary wsadowe, umieszczone w dowolnym miejscu matrycy. Prowadzenie procesu w próżni i gazach obojętnych umożliwia zachowanie idealnej powierzchni detali (rys.4).

#### Symulator hartowania stali narzędziowych

Ustalenie zależności między strukturą, procesem technologicznym i właściwościami użytkowymi ma kluczowe znaczenie dla poprawnego

i optymalnego prowadzenia procesów wytwarzania narzędzi, ponieważ dobór właściwego materiału wraz z odpowiednim procesem technologicznym zapewnia największą trwałość produktu przy najniższych kosztach. Przyspieszony rozwój cywilizacyjny zapoczątkował wzrost oczekiwań konsumpcyjnych wobec szeregu branż przemysłowych dotyczących jakości i długotrwałości wyrobów przy jednoczesnych oczekiwaniach redukcji wytwarzania szkodliwych substancji i minimalizowania poboru energii. Spowodowało to szereg zmian w samym podejściu do wytwarzania.

Tradycyjny sposób dochodzenia do optymalnych właściwości produktu i parametrów procesu technologicznego metodą prób i błędów jest dziś powszechnie zastępowany przez metody symulacyjne i predykcyjne, pozwalające na projektowanie zarówno wyrobu jak i jego procesu technologicznego za pomocą komputera. W wielu przypadkach komputer całkowicie przejął kontrolę nad wytwarzaniem, a rosnąca popularność tego rozwiązania widoczna jest w rozszerzającym się rynku urządzeń cyfrowych. W obróbce cieplnej i cieplno-chemicznej również obserwuje się zainteresowanie aplikacjami do modelowania i symulowania tych zjawisk. Dotyczy to zarówno samego przebiegu procesu jak i właściwości wynikowych obrabianych elementów [14-19].

Programy symulacyjne ogólnego zastosowania uwzględniają jedynie modelowe parametry zjawiska, co powoduje, że otrzymane wyniki są obarczone pewnym błędem. Sposobem na zwiększenie precyzji obliczeń jest uwzględnienie parametrów otoczenia, w którym zachodzi proces, w tym przypadku indywidualnej charakterystyki pieca do hartowania, jak ma to miejsce w przypadku symulatora G-Quench Pro. Może wydawać się, że wartości indywidualne maszyny wiążą aplikację z konkretnym urządzeniem czyniąc ją nieprzydatną dla innych, jednakże odpowiednia parametryzacja ustawień pozwala zachować uniwersalność oprogramowania. Tym samym może być ono stosowane na różnych urządzeniach. Mimo to wciąż jest to rozwiązanie rzadko spotykane w praktyce.

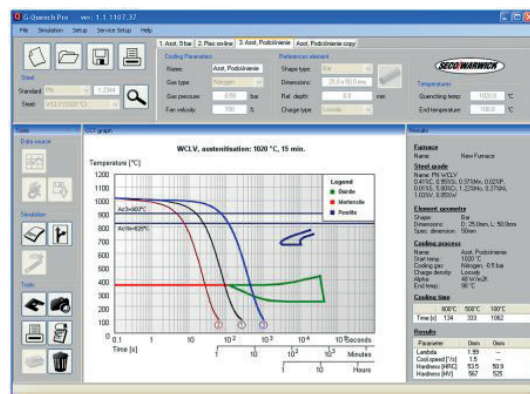
Program G-Quench Pro (rys. 5) służy do symulacji i kontroli przebiegu procesów hartowania stali narzędziowych w gazie, redukując potrze-

#### Bibliografia

- [1] M. Korecki, J. Olejnik, R. Gorockiewicz: Rozwój pieców HPQ na przykładzie aplikacji nawęglania próżniowego FineCarb, obróbki cieplnej stali HSLA oraz nowoczesnej obróbki cieplnej narzędzi. XI Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2007.
- [2] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel: Jednokomorowy piec próżniowy HPGQ z efektywnością hartowania porównywalną z olejem. IV Konferencja Naukowa Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni. Spała 2010.
- [3] E. Wołowicz, L. Małdziński, M. Korecki: Komputerowe narzędzia wspierające obróbkę cieplną i cieplno-chemiczną. Piec Przemysłowe & Kottły XI/ XII 2011, 8-14.
- [4] E. Wołowicz, P. Kula, M. Korecki, J. Olejnik: Simulation and Control of Tool Steel Quenching Process. 25th European Conference on Modeling and Simulation. Kraków 2011, 357-361.
- [5] Nord American Die Casting Association: Special Quality die steel & heat treatment acceptance criteria for die casting dies. Vacuum heat treatment, 2008.
- [6] FORD Motor Company, Advanced Manufacturing Development - DC2010: Die insert material and heat treatment performance requirements, 2005.
- [7] GM Powertrain Group DC-9999: Die insert material and heat treating specification, 2005.

- [8] J. Olejnik: Vacuum furnaces with high pressure charge cooling. *Metallurgy* 3/2002.
- [9] M. Korecki: Technical and Technological Properties of Gas Cooling in High Pressure Chamber. IX Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2005.
- [10] J. Kowalewski, M. Korecki, J. Olejnik: Next Generation HPQ Vacuum Furnace. Heat Treating Progress 8 2008.
- [11] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel: Single-Chamber 25 bar HPGQ Vacuum Furnace with Quenching Efficiency Comparable to Oil. *Industrial Heating* 9 2009, 73-77.
- [12] M. Korecki, J. Olejnik, Z. Szczerba, M. Bazel, R. Atraszkiewicz: Piec próżniowy Seco/Warwick typ 25VPT z hartowaniem w azocie i helu pod ciśnieniem 25 bar i jego nowe możliwości technologiczne. XIII Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2010.
- [13] M. Korecki, P. Kula, J. Olejnik: New Capabilities in HPGQ Vacuum Furnaces. *Industrial Heating* 3 2011.
- [14] L.A. Dobrzański, J. Madejski, W. Malina, W. Sitek: The prototype of an expert system for the selection of high-speed steels for cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology* 56/1-4 1996, 873-881.
- [15] L.A. Dobrzański, J. Trzaska: Application of neural network for the prediction of continuous cooling transformation diagrams. *Computational Materials Science* 30/3-4 2004, 251-259.
- [16] P. Kula, R. Atraszkiewicz, E. Wołowicz: Modern gas quenching chambers supported by SimVac Plus hardness application. *AMT Heat Treatment*, Detroit 2007.
- [17] P. Kula, M. Korecki, R. Pietrasik et al.: FineCarb - the Flexible System for Low-pressure Carburizing. New Options and Performance. The Japan Society for Heat Treatment 49 2009, 133-136.
- [18] W. Sitek: Methodology of high-speed steels design using the artificial intelligence tools. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 39/2 2010, 115-160.
- [19] E. Wołowicz, L. Małdziński, M. Korecki: Nowe inteligentne programy wspierające produkty Seco/Warwick. XIV Seminarium Nowoczesne trendy w obróbce cieplnej. Bukowy Dworek 2011, 71-80.

bę przeprowadzania procesów testowych. Podstawy matematyczne procesu chłodzenia oraz zależności twardości materiału od czasu chłodzenia zostały opracowane na podstawie badań przeprowadzonych w Politechnice Łódzkiej i firmie Seco/Warwick S.A. oraz dostępnych danych literaturowych.



Rys. 5. Ogólny widok programu do symulacji i kontroli przebiegu procesu hartowania stali narzędziowych.

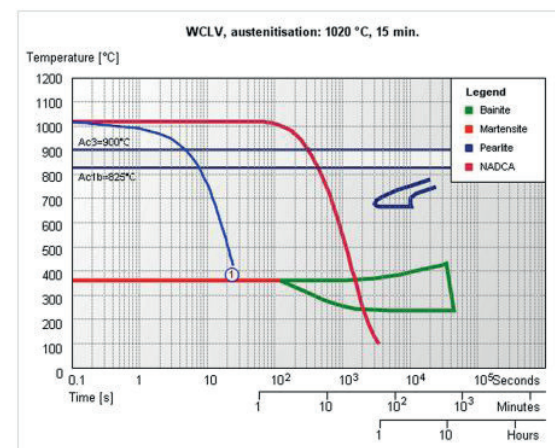
Bezpośrednim rezultatem symulacji jest wyznaczenie przebiegu krzywej chłodzenia dla danego materiału w określonych warunkach. Jej wyznaczenie następuje na podstawie parametrów materiału, procesu i fizycznego elementu takich jak temperatura hartowania, ciśnienie i rodzaj gazu chłodzącego, wymiary elementu, i jego krzywizna oraz gęstość upakowania elementów w komorze chłodzącej. W połączeniu z indywidualnym wykresem fazowym materiału, krzywa daje informację o fazach przez które przechodzi stal podczas obróbki. Ostatecznym efektem symulacji jest określenie szybkości hartowania oraz przewidywanej wynikowej twardości materiału.

Jak wspomniano wcześniej, indywidualne parametry urządzenia hartującego w dużym stopniu determinują rzeczywisty przebieg procesu sprawiając, że te same parametry ustawione na dwóch różnych urządzeniach mogą dać w wyniku różnie zahartowane stale. Z tego powodu program na etapie instalacji jest konfigurowany pod kątem konkretnego przypisanego mu urządzenia fizycznego. Tym samym charakterystyka indywidualna pieca jest również uwzględniana przy obliczaniu wynikowych własności produktu.

### Kontrola przebiegu procesu chłodzenia

Monitoring przebiegu procesu chłodzenia jest istotnym elementem cyklu produkcyjnego.

Jakkolwiek kontrola procesu jest zabiegiem cyklicznym i występuje na każdym etapie produkcji (projektowanie, przebieg, badanie produktu końcowego), tutaj jest wyjątkowo ważna, ponieważ jest to ostatni etap w którym istnieje możliwość interwencji i zmiany parametrów hartowania. Badanie produktu końcowego daje jedynie możliwość stwierdzenia po fakcie złego przebiegu obróbki. Tymczasem monitorowanie hartowania w czasie rzeczywistym daje możliwość natychmiastowej ingerencji operatora, w razie wykrycia niezgodności w przebiegu procesu.



Rys. 6. Monitorowanie poprawności przebiegu procesu hartowania w czasie rzeczywistym w programie G-Quench Pro.

W trybie monitora program potrzebuje zdalnego lub bezpośredniego połączenia z urządzeniem hartującym. Współpracując z komputerem pieca, pobiera od niego informacje o temperaturze aktualnie panującej w komorze lub w elemencie hartowanym a następnie nanosi odczyty na wykres fazowy. Na krzywą chłodzenia wyznaczoną przez symulator nakładana jest krzywa będąca rzeczywistym zapisem procesu (rys. 6). W ten sposób następuje bieżąca weryfikacja poprawności przebiegu hartowania.

Stale narzędziowe są podstawowym materiałem do kształtowania wszystkich grup materiałów i produkcji narzędzi. Właściwe zaprojektowanie i kontrola procesu ich hartowania ma istotne znaczenie dla końcowego efektu obróbki elementu a tym samym jego żywotności i przydatności w eksploatacji. Nowoczesne urządzenia i technologie umożliwiają masową i efektywną obróbkę stali narzędziowych a stosowanie programów symulacyjnych procesów hartowania umożliwia przewidywanie rezultatów procesu z dużą dokładnością, przy jednoczesnej znacznej redukcji czasochłonnych badań eksperymentalnych.