



Material, Wytwarzanie i Cyfrowa Symulacja Procesu Hartowania Miecza Japońskiego

Oryginalny tekst:

“Materials Science Research International, Vol.2, No.4, pp.193-203 (1997)”



Tatsuo INOUE

Department of Energy Conversion Science, Faculty of Energy Science, Kyoto University
Yoshida-Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-1885, Japan

Tłumaczenie: Dawid Woźniak (kontakt: maadsun@interia.pl)

Od tłumacza

Tekst przetłumaczyłem dla celów własnych, a także by mogły z niego skorzystać osoby nieznające języka angielskiego, a zainteresowane tematem. Tekst przetłumaczyłem najlepiej jak umiałem, nie jestem zawodowym tłumaczem wybaczone mi więc wszelkie błędy w tej sztuce. Przy tłumaczeniu niejasności uzupełniałem na podstawie „The Craft of the Japanese Sword” Leon nad Hiroko Kapp, Yohindo Yoshihara.

Od melona

Tekst został poprawiony tylko w kilku miejscach ze względu na odmianę wyrazów. Moje wyjaśnienia mają na celu przybliżenie procesów opisywanych w tym artykule osobom nie zajmującym się na co dzień obróbką stali od strony teoretycznej.

Skrót

Opracowanie zawiera opis tradycyjnych metod przygotowywania rodzaju stali o nazwie **tamahagane** w technologii **tatara** oraz procedura tworzenia miecza przedstawiona z punktu widzenia przemian termo-mechanicznych. Wyjaśnienie, na podstawie cyfrowego modelu opartego na teorii metalo-termiczno-mechanicznej, procesu powstawania linii hartowania (**hamon**), krzywizny (**sori**) oraz rozkładu naprężeń w czasie procesu hartowania. Za pomocą cyfrowego modelu przeanalizowano rozkład i przebieg temperatur w czasie hartowania, rozkład i przebieg naprężeń oraz rozkład i zmiany w mikrostrukturze stali.

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie japońskich mieczy, pierwotnie używanych jako broń, w teraźniejszych czasach stało się tradycyjnym rzemiosłem o charakterze artystycznym, opublikowano wiele opracowań na ten temat zarówno w języku japońskim jak i angielskim. Mieczami zainteresował się również świat współczesnej nauki. Tawara, z japońskiego Laboratorium Badań Nad Mieczem na Uniwersytecie w Tokio, jest autorem opracowania na temat mieczy z punktu widzenia metalurgicznego. Tawara mierzył **rozkład zawartości procentowej węgla, rozkład nawęglenia** i twardość w przekroju mieczy związane z linią hartowania (**hamon**) i krzywizną (**sori**). Podobne opracowania stworzyli Bain, Suzuki, Tsuwa i inni.

Niewiele jednak powstało opracowań z mechanicznego punktu widzenia. Ishikawa, w swoim opracowaniu, opisał proces przecinania obiektów na podstawie teorii cięć i kształt miecza z punktu widzenia dynamiki. Analizę deformacji i naprężeń w trakcie procesu hartowania, na podstawie metody elementów skończonych, opracowali Fujiwara i Hanabusa.

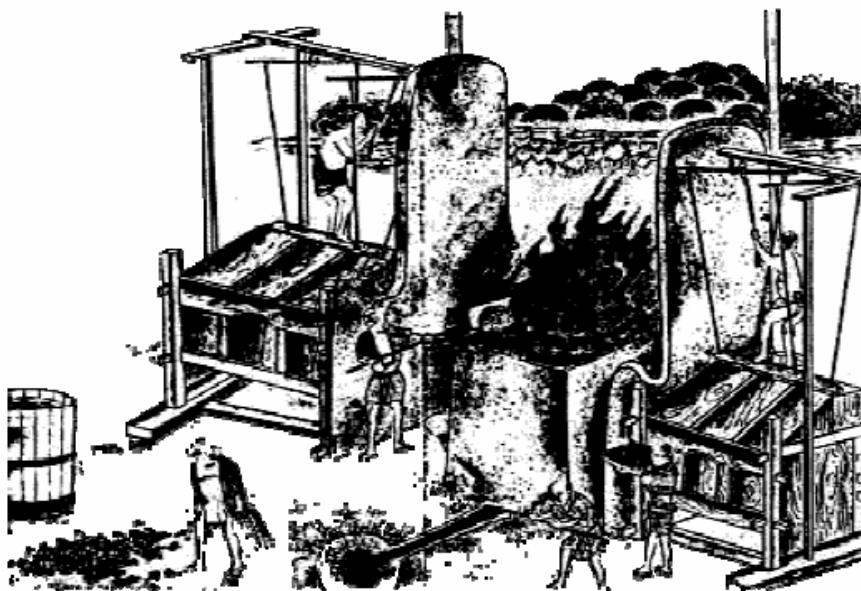
Japońskie miecze wytwarzane są z tradycyjnej, japońskiej stali zwanej **tamahagane**, która powstaje z czarnego piasku. Piasek ten to mieszanina żelaza w czystej formie, tlenków żelaza, związków krzemu i innych (**bardzo wysoka zawartość SiO₂ ponad 60% - to chyba stąd ta nazwa**). Cały proces kucia jest bardzo specyficzny i wyrafinowany, czego najlepszym przykładem jest warstwowa technologia skuwania.

Jednym z najciekawszych i najważniejszych etapów tworzenia miecza jest hartowanie poprzedzające szlifowanie i polerowanie, w czasie którego powstaje charakterystyczna krzywizna zwana **sori**. Druga część opracowania stanowi opis cyfrowego modelu opartego na kodzie 'HEARTS', traktującego o procesie hartowania.

Kod został oparty na teorii metalo-termo-mechanicznej odnoszącej się do fundamentalnych wzorów opisujących zmiany mikrostrukturalne, termiczne i naprężeniowe. Przebieg wszystkich trzech zjawisk został sprzężony i na tej podstawie stworzono model. Po przedyskutowaniu paradoksalnej charakterystyki przewodności termicznej pomiędzy ostrzem pokrytym gliną, która stanowi termiczna izolacja oraz woda stanowiącą środowisko chłodzące opracowano wnioski z przebiegu modelowej symulacji.

2. Przygotowanie tradycyjnej Japońskiej stali

Praktycznie wszystkie japońskie miecze, z nielicznymi wyjątkami, kuto z **tamahagane** lub szlachetnych stali, specjalnie przygotowanych w technologii **tatara** przy użyciu czarnego piasku, a nie przy użyciu normalnych rud, jakie można zobaczyć na starych grafikach.



Rys.1 Stara grafika dymarki **tatara**.

Stal używana w Japonii przed restauracją **Meiji** w 1968 była wytwarzana tą właśnie metodą, nowoczesne technologie wytopiania stali i żelaza zostały opracowane w Europie. W tamtym czasie produkowano 10000 ton **tamahagane** rocznie.

Stali tej używano nie tylko do produkcji mieczy, ale również do produkcji broni palnej, narzędzi, gwoździ oraz innych przedmiotów użytku codziennego. W epoce **meiji**, **tamahagane** zastąpiono stalami produkowanymi w technologii europejskiej.

Japoński Instytut Żelaza i Stali stworzył eksperymentalną dymarkę **tatara** w Sugaja, w prefekturze Shimane i zgromadził interesujące dane na temat owej technologii wytopiania stali.

Powodowane brakiem stali do kucia mieczy, Japońskie Muzeum Mieczy, Nippon Bijutsu Token Hozon Kyokai (Stowarzyszenie Zachowania Japońskiej Sztuki Miecza), założyło kompleks dymarek pracujących w technologii **tatara** w Torigami, w prefekturze Shimane, w kooperacji z Hitachi Metals Ltd. w 1977, i dostarcza płatnerzom 3-4 tony stali rocznie.

Czarny piasek z zawartością 2-5% żelaza wydobywa się w górach Chugoku. Zawartość czystego żelaza w piasku podnoszona jest do 60% metoda magnetyczna (**magnezem wyciągają tlenki żelaza – się do niego kleją☺ - jest to sposób wzbogacania wsadu – czyli jego oczyszczania**). Kiedyś wyodrębniano ziarna żelaza poprzez płukanie, zaprzestano jednak tej metody ze względu na zanieczyszczenie środowiska. Tak wzbogacony czarny piasek (masa **satetsu**) zawiera 8% czystego żelaza Fe i tlenku żelaza Fe_2O_3 z bardzo małą zawartością zanieczyszczeń takich jak 0,026% fosforu i 0,002% siarki, które to są szkodliwe dla stali węglowej. Skład chemiczny przedstawiono w Tabeli 1. (**bardzo wysoka zawartość krzemionki SiO_2 i jej przewaga nad tlenkami zasadowymi wskazuje że jest to „wsad kwaśny” – czyli żużel z niego utworzony nie jest rzadko płynny i ma odczyn kwaśny**)

	TiFe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	P	S	CaO	MgO	V ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂
Virgin	3.46	0.91	3.99	68.32	0.026	0.002	22.26	0.86	0.03	17.26	0.42
Enriched	60.43	22.03	6.19	7.68	0.080	0.021	0.90	0.37	0.30	2.38	0.93

(wt%)

Tabela 1 Przykład składu chemicznego piasku żelaznego w stanie pierwotnym (virgin) i po wzbogaceniu (enriched).

Wzbogacony czarny piasek wraz z węglem drzewnym umieszcza się w dymarce ręcznie.

Rys 2 przedstawia przekrój dymarki wraz z drenażem o głębokości trzech metrów. Jedyna różnica w stosunku dymarki z **Rys 1** to nadmuch, który w tym przypadku jest realizowany poprzez dmuchawy elektryczne.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.2:

furnance – dymarka

piepes – przewody doprowadzające powietrze

air chamber – dymarka

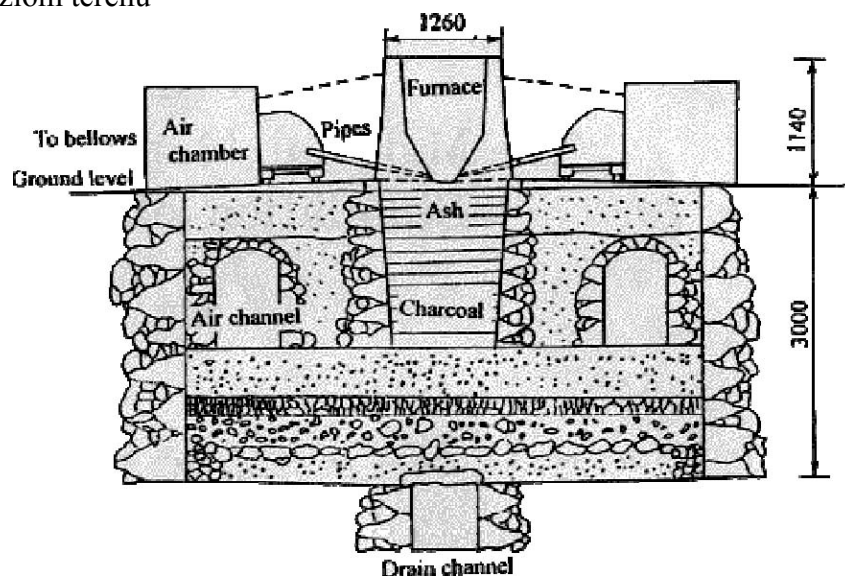
air channel – tunel powietrzny

ash – popiół

charcoal – węgiel drzewny

drain channel – drenaż

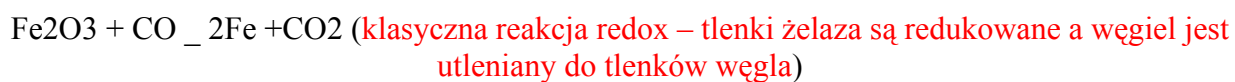
ground level – poziom terenu



Rys.2 Przekrój przez dymarkę tatara (można zauważyć duże podobieństwo z wielkim piecem zarówno jeśli chodzi o reakcje chemiczne jak i produkt końcowy. Jednakże tutaj mamy produkt „brudniejszy” – właściwy produkt jest wymieszany z zanieczyszczeniami, które trzeba usunąć później i w fazie stałej – w porównaniu z surówką ciekłą z wielkiego pieca)

Proces wypalania trwa 70 godzin. Temperatura w dymarce wynosi 1200-1500 °C jest to temperatura niższa od punktu topnienia żelaza (czystego pierwiastka, natomiast wraz ze wzrostem zawartości węgla w roztworze zmniejsza się temperatura wyznaczona na wykresie żelazo-cementyt linią likwidusu i solidusu). Kilka zdań wyjaśnienia. Tylko czyste pierwiastki mają temperaturę topnienia stałą, dla roztworów różnych pierwiastków ma się sprawa inaczej. W uproszczeniu – w cieczy zaczyna się wydzielać jeden składnik – pozostała jest ciekła – to temperatura wyznaczona linią likwidusu na

wykresie (liquid - ciecz), następnie mamy temperaturę, dla której w roztworze mamy już tylko ciało stałe bez cieczy – solidus (solid – ciało stałe). Ponadto należy pamiętać, że przemiana, (np. topnienie) zachodzi PO PRZEKROCZENIU DANEJ TEMPERATURY – w danej temperaturze np. likwidusu mamy stan równowagi, – czyli tyle samo się robi stałych kawałków co topnieje. By jeszcze bardziej zaciemnić należy pamiętać, że temperatura solidusu i likwidusu są zależne od procentowej zawartości pierwiastków. Jest miejsce w układzie żelazo-węgiel gdzie te linie się spotykają – tzn. z cieczy wydziela się od razu ciało stałe – to eutektyka – tworzy się w temperaturze poniżej 1200 st. C, przy zawartości węgla w roztworze 4,3%. Wytapiane są zanieczyszczenia. Dochodzi również do strat związków zawartych w glinie, z której buduje się dymarki. W czasie całego procesu początkowa grubość ścian dymarki wynosząca 200-400 mm zostaje zredukowana do 50-100 mm. (cóż nie znano materiałów o większej ogniotrwałości – choćby czystsza glina – o większej zawartości Al_2O_3) Proces zachodzący w **tatarze** polega na **redukcji** tlenków żelaza. Gdy temperatura jest wystarczająco wysoka tworzy się tlenek węgla, który to reaguje z tlenkiem żelaza w wyniku czego powstaje czyste żelazo i dwutlenek węgla w postaci gazowej.



Przy temperaturach osiąganych w dymarkach **tatarze** wytapiane są zanieczyszczenia, które przemieszczają się w dolne partie dymarki pozostawiając czyste żelazo. W dodatku przy wysokiej temperaturze czysty węgiel zawarty w węglu drzewnym miesza się z żelazem tworząc stal. **Kilka słów wyjaśnienia.** Zanieczyszczenia (tlenki np.) tworzą żużel i to on właśnie się przemieszcza w dolne partie. Nadmiar węgla powoduje, że redukują się tlenki, tworzy się atmosfera ochronna – żelazo się ponownie nie utlenia, a ponadto węgiel rozpuszcza się w żelazie – tworząc roztwór stały żelaza z węglem.

Po 70 godzinach i wygaśnięciu paleniska dymarkę burzy się. Z wypalonego żużlu wyciąga się blok stali przypominający strukturą gąbkę zwany **kera** (patrz **Rys.3**). Ta gąbkowa forma ma 2,7 m długości, 1 m szerokości i 200-300 mm grubości, waży 2-2,5 tony z czego 1,5-1,8 tony to czysta stal. Warto wspomnieć, iż w celu przeprowadzenia całego procesu do dymarki wkłada się 8 ton czarnego piasku i 13 ton węgla drzewnego. Taki blok stali kosztuje kilka tysięcy dolarów i jest około dwustu razy droższy od zwykłej stali.



Rys.3 **Kera.**

Stal znajdująca się na brzegach bloku, gdzie w stopniu zadawalającym nastąpiła (**redukcja**), zachodząca dzięki bliskiemu sąsiedztwu wlotów nadmuchu, to **tamahagane** lub stal szlachetna, co

tłumaczy się z języka japońskiego jako matka metali (w strefie nadmuchu mamy najwyższe temperatury czyli tam reakcja przebiegała w większej masie – objętości w porównaniu z innymi miejscami mniej nagrzanymi). Inne części bloku o odrębnym składzie chemicznym przedstawionym w Tabeli 2 również używa się do produkcji mieczy.

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Ti
<i>Tamahagane</i>	1.05	0.01	0.01	0.029	0.002	Nil	Tr	<0.01	0.003
Forged steel	0.54	0.03	<0.01	0.029	0.005	0.001	<0.01	0.01	0.008
Core steel	0.28	0.02	0.02	0.029	0.007	0.001	0.01	0.01	0.008
(wt%)									

Tabela 2. Skład chemiczny **tamahagane**, stali przemysłowej (forged steel) i stali używanej na rdzeń (core steel).

Najkorzystniejszy skład chemiczny stali to 1.0-1.4 % C, 0.02-0.03% P, 0.006% S i 0.003- 0.004% Ti. Taki skład jest trudny do osiągnięcia nawet w stalach przemysłowych (zobacz Tabela 2).

Stal o taki składzie chemicznym (bardzo mało krzemu, manganu jest bardzo droga, ponadto tak niska zawartość siarki też dużo kosztuje)

Wyprodukowana w ten sposób stal jest chłodzona w zimie (chyba w ziemi) i rozprowadzana do 300 zarejestrowanych, profesjonalnych płatnerzy w całej Japonii.

3. Wytwarzanie miecza japońskiego

Kawałek stali o zróżnicowanej zawartości węgla jest poddawany nagrzewaniu w środowisku nawęglającym lub odwęglającym. Proces ten nosi nazwę **jigane-orooshi**, zachodzi on w dymarkach opalanych węglem drzewnym i słomą ryżową przy nadmuchu. Do odwęglania dochodzi w sąsiedztwie nadmuchów, CO₂ przyspiesza spiekanie górnych warstw. Proces ten niektórzy płatnerze przeprowadzają osobiście we własnych paleniskach kowalskich.

Kolejne etapy kucia przedstawiono na **Rys.4**. Kowal wykuwa płaską płytkę z rączką zwaną **tekoita**, na niej to układa się pokruszone płaskie kawałki stali całość okrywa się warstwą papieru, glinki i słomy ryżowej by zapobiec utlenianiu zewnętrznych powierzchni stali pod wpływem dostępu powietrza. SiO₂ zawarty w glince przyczynia się do wzrostu ilości zanieczyszczeń w żużlu.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.4

hammered into plate – wykuta płytka

crashing – pokruszone kawałki stali

japanese paper – papier ryżowy

hard skin steel – twarda stal okrywająca

soft core steel – rdzeń z miękkiej stali

quenching – chłodzenie

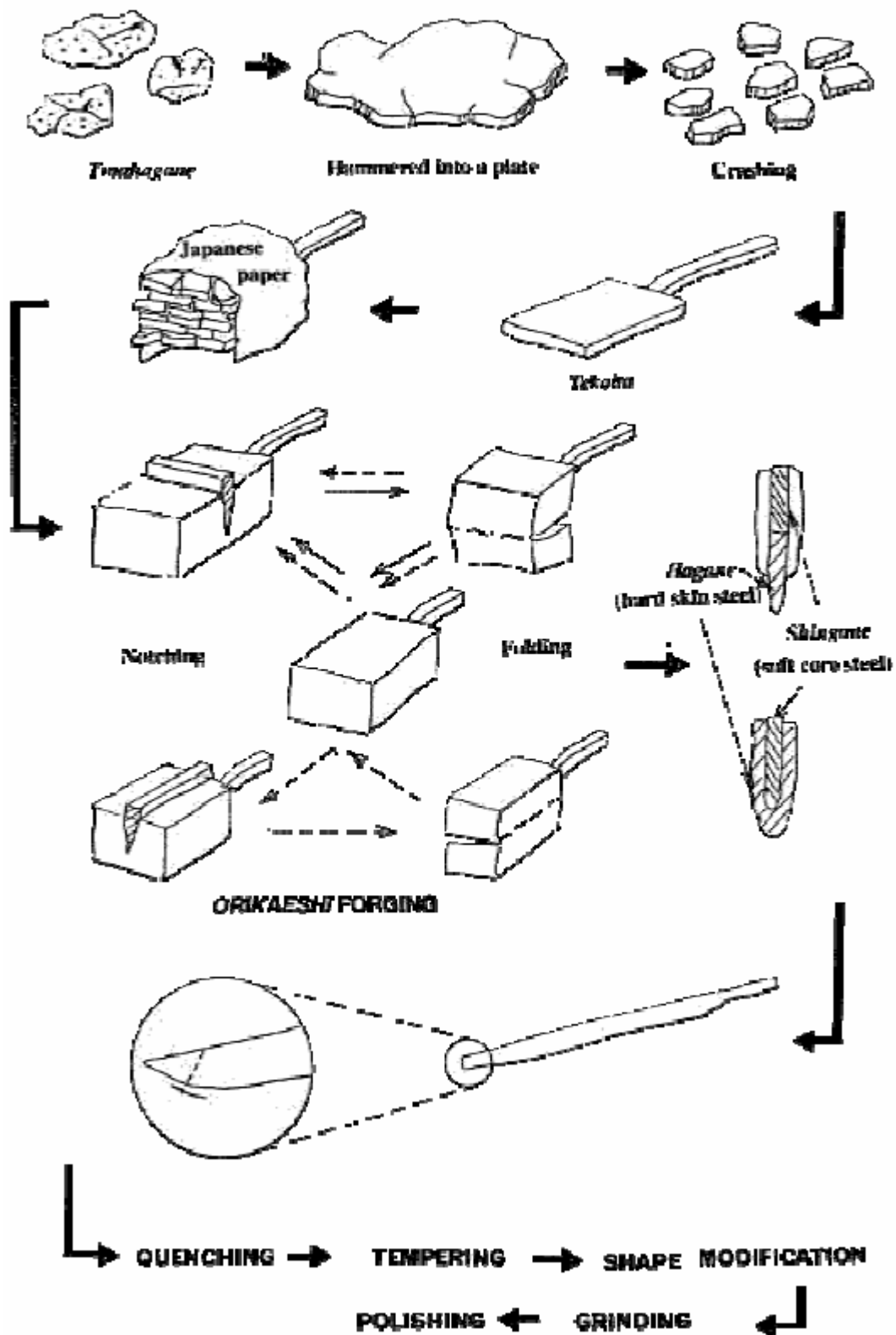
tempering – hartowanie

shape modification – modyfikacja kształtu (powstawanie krzywizny)

grinding – szlifowanie

polishing – polerowanie

THE JAPANESE SWORD



Rys.4 Proces tworzenia miecza japońskiego.

Kucie polega na składaniu płytki stali na pół rozkuwaniu do pierwotnych wymiarów i kolejnym składaniu. Proces ten powtarza się od pięciu do piętnastu razy, w ten sposób uzyskuje się warstwowy materiał składający się od 1024 (=2¹⁰) do 32768 (=2¹⁵) warstw. Charakterystyczny efekt warstwowości stali zależy od techniki kowala i jest widoczny na powierzchni miecza, kilka przykładów przedstawiono na **Rys.5**.

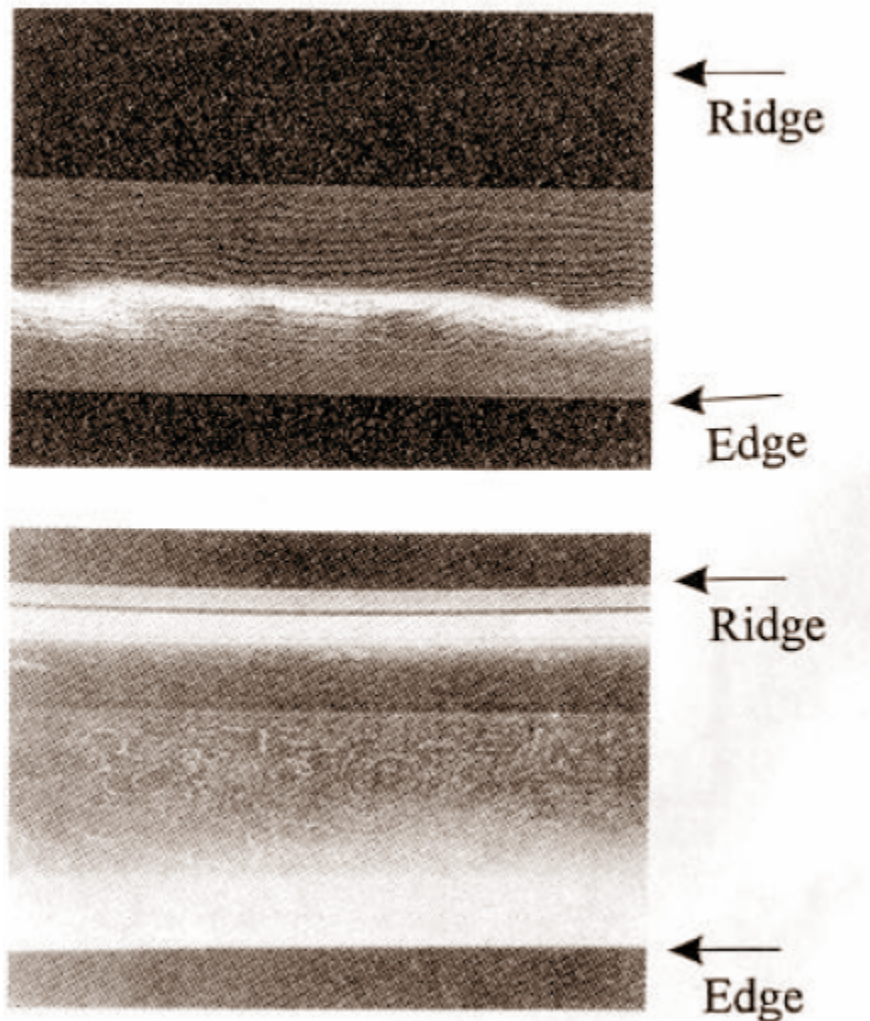


Fig.5 Warstwowosc bedaca efektem orikaeshi.

Tłumaczenie objaśnien do Rys.5

ridge – grzbiet (mune)

edge – ostrze (ha)

Takie składanie każdej warstwy z osobna podczas procesu **orikaesi** udoskonala zjawisko zwane mechanicznym zgrzewaniem, dzięki któremu uzyskuje się bardzo czystą powierzchnię zgrzewu. Osiągane jest to poprzez rozpryskiwanie zanieczyszczeń takich jak tlenki (zendra) i tym podobne z obrabianej powierzchni w postaci iskier w wyniku młotkowania. W ten sposób powstają pewne straty surowca dlatego też waga gotowego miecza jest mniejsza o 100-700 g w stosunku do bloku stali na początku procesu.

Sztaba stali niskowęglowej używanej na rdzeń (**shingane**) jest okrywana warstwą stali wysokowęglowej okrywającej (**kawagane** lub **hagane**), do tego właśnie celu używa się **tamahagane** (patrz **Rys.4**). ten proces nazywa się **tsukurikomi**. Po wstępnym szlifowaniu, wykonywanym przez

kowala, miecz przekazywany jest do hartowania (*yakiire*), który to proces jest tematem kolejnej części niniejszego opracowania.

Przed hartowaniem na głownię nakłada się warstwę gliny zmieszanej ze sproszkowanym węglem drzewnym (*yakiba-tsuchi*) w celu kontrolowania przewodności cieplnej (patrz **Rys.6**). (*Zawartość węgla drzewnego w nakładanej na klingę glince przyczynia się do ochrony klingi podczas nagrzewania przed utlenieniem – tzn. wypala się węgiel z gliny nie dopuszczając do powstania nadmiaru zgorzeliny na klindze*)



Fig.6 **Tsuchioki**, nakładanie mieszanki gliny i sproszkowanego węgla drzewnego na ostrze.

Warstwa gliny przy ostrzu jest cieńsza niż warstwa na pozostałej części miecza (patrz **Rys.7**). Głownię pokrytą gliną nagrzewa się do temperatury 800-850 °C poczym zanurza się ją w chłodnej wodzie (Temperatura nagrzanego ostrza oraz wody zależy od szkoły płatnerskiej, użytego materiału i wymiarów miecza). Przy temperaturze 800-850 °C stal przechodzi w strukturę austenityczną, w której to możliwe jest połączenie żelaza z węglem. W czasie gwałtownego chłodzenia austenit przechodzi w martenzyt trwale wiążąc węgiel i tworząc twardą stal. W miejscach pokrytych grubą warstwą gliny schłodzenie następuje wolniej i austenit przechodzi w ferryt (żelazo z domieszką węgla poniżej 0.025%) i perlit (mieszaninę żelaza z 0.77% węgla).

Kilka słów wyjaśnienia.

Wg składu chemicznego (tab. 2) stali **tomahagane** jest to stal węglowa nadeutektoidalna bardzo wysokiej jakości. Stale te hartuje się z zakresu niepełnego rozpuszczenia cementytu (węglika żelaza – wiążącego węgiel w stali, gdy węgiel w stali jest niezwiązany mamy żeliwo szare z grafitem), tzn. że przed hartowaniem w roztworze stałym występuje austenit z rozpuszczonym w nim węglem i węglikiem – cementytem NIEROZPUSZCZONYM. Ilość rozpuszczonego węgla w stali zwiększa się wraz z temperaturą, ale zawsze wynosi powyżej 0,77%, jego ilość wyznacza krzywa na układzie żelazo – cementyt między punktem S i E.

Stal wykorzystywana na rdzeń (tab. 2) jest stalą węglową podeutektoidalną wysokiej jakości.

Nagrzanie jej do podanych temperatur powoduje rozpuszczenie się całego węgla w roztworze i mamy wtedy austenit o takiej zawartości węgla ile jest go procentowo w roztworze.

Szybkość krytyczna chłodzenia stali to taka szybkość, przy której jeszcze powstaje martenzyt, tzn. że aby zaszła przemiana martenzytyczna (utworzył się martenzyt – szybkość musi być większa od krytycznej – dla stali węglowych mówimy tu o kilkuset stopniach na sekundę)

Szybkie chłodzenie stali **tomahagane** (z szybkością większą od krytycznej) powoduje, że węgiel nie zdąży się wydzielić z roztworu w postaci węgliku – cementytu. Podczas chłodzenia zachodzi zmiana typu sieci krystalicznej żelaza z $\gamma \rightarrow \alpha$; w żelazie γ może rozpuścić się tysiące razy więcej węgla niż w żelazie α , a podczas bardzo szybkiego chłodzenia węgiel ten nie może przemienić się w cementyt i jednocześnie zmniejszyć swą ilość w żelazie. Ten „nadmiarowy”, niewydzielony węgiel pozostaje w sieci krystalicznej stali powodując ogromne naprężenia, zwiększając twardość i wytrzymałość stali tworząc MARTENZYT. Tak, więc po hartowaniu na martenzyt stali **tomahagane** otrzymujemy martenzyt i węgliki- cementyt nierozpuszczony podczas nagrzewania.

Stal na rdzeń o niższej zawartości węgla, dzięki obniżonej szybkości chłodzenia przez warstwę glinki nie jest hartowana na martenzyt. Tu jest podczas chłodzenia wystarczająca ilość czasu (kilka sekund!!! więcej ☺) by węgiel zdążył wydzielić się z roztworu stałego pod postacią perlitu (mieszaniny uporządkowanej!!! Cementytu i ferrytu) i ferrytu. (o mniejszej wytrzymałości niż martenzyt ale o większej ciągliwości – odporności na pęknięcie, sprężystości)

Chłodzenie w wodzie spowodowane jest bardzo dużą szybkością krytyczną stali węglowych (oleje chłodzą wolniej). Wraz ze zmniejszaniem się temperatury wody rośnie szybkość chłodzenia wody.

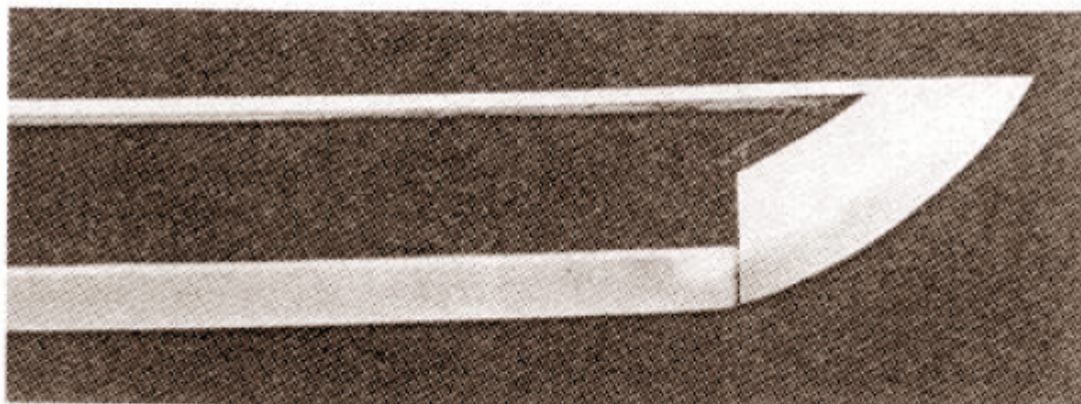
Woda destylowana ma za małą szybkość chłodzenia, tak, więc (wniosek melona) metodą prób i błędów płatnerze ustalali, która woda chłodzi bardziej optymalnie (z danego źródła o zawartości tam jakichś soli mineralnych). Ponadto niewielki dodatek soli kuchennej (innych też), moczu, zasady (choćby odrobina wapienia) zmienia radykalnie zdolność chłodzenia wody w danym zakresie temperatur.



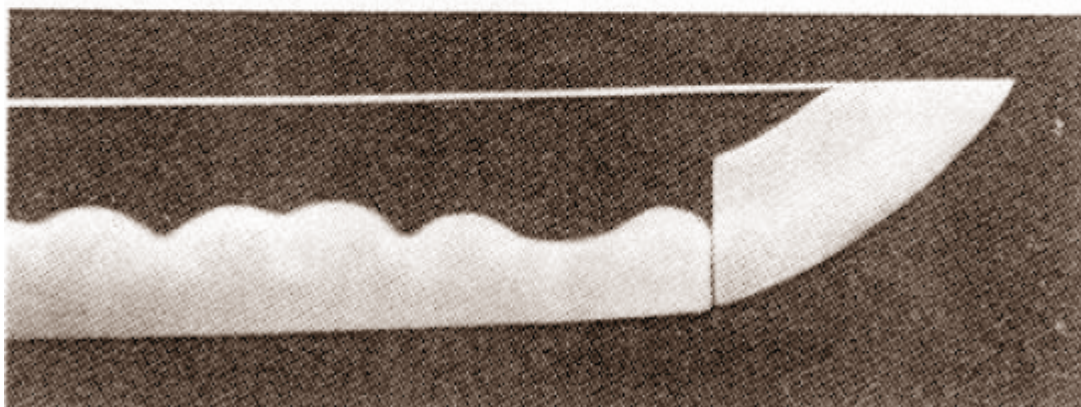
Rys.7 Rozkład glinki (**yakiba-tsuchi**) na przekroju głowni.

W procesie hartowania w miejscu gdzie glinka była cieńsza i hartowanie przebiegło gwałtowniej stal jest twarda i matowa o strukturze martenzytycznej, reszta głowni pozostaje błyszcząca o strukturze

perlitycznej i ferrytycznej. Granica pomiędzy matową, a błyszczącą częścią głowni nazwa się **hamon** (patrz Rys.8).



(a) *Suguha*, straight pattern.



(b) *Magariba*, wavy pattern.

Rys.8 Hamon, (a) wzór prosty (straight pattern), (b) wzór falowany (wavy pattern).

Końcowy wygląd linii hartowania (**hamon**) zależy od sposobu nałożenia glinki.

4. Streszczenie metalo-termo-mechaniki

W przypadku hartowania mieczy japońskich i innych przemian termo-mechanicznych fazy transformacji zależne są od struktury metalu, temperatury i naprężeń. Te trzy zagadnienia muszą zostać sprzężone gdyż w naturze oddziałują wzajemnie na siebie. Zależności te ilustruje Rys.9.

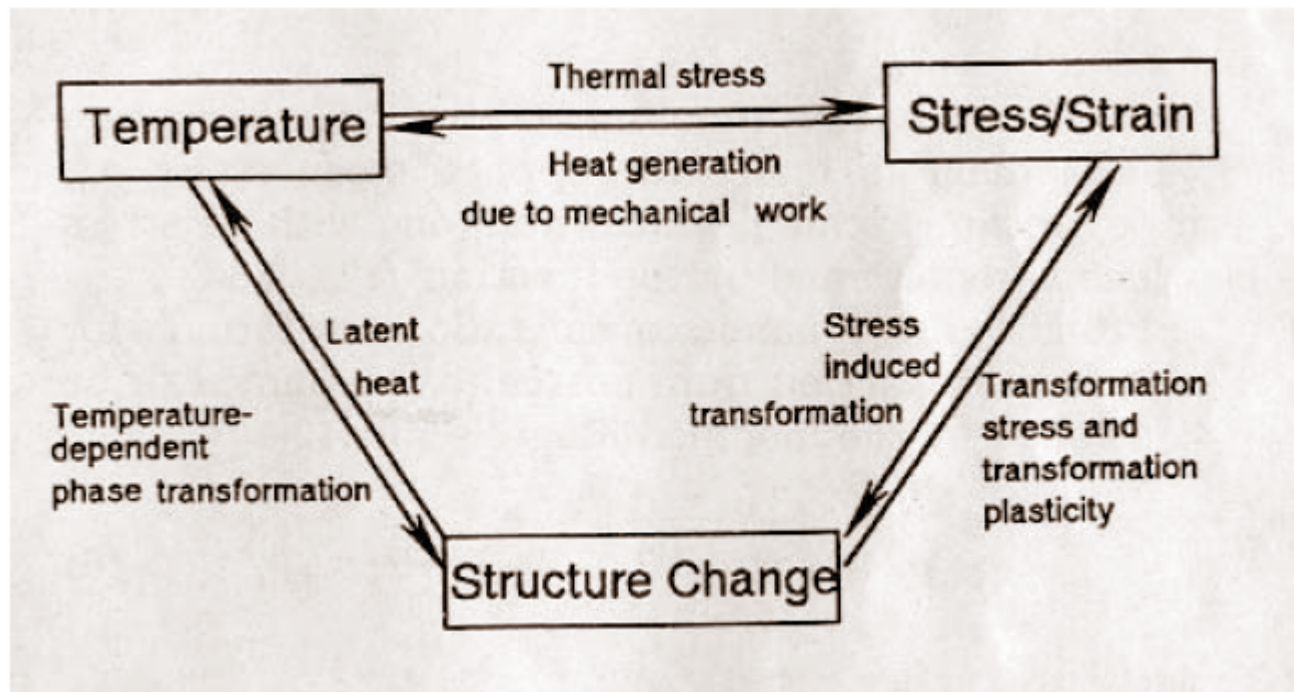


Fig.9 Zależności pomiędzy strukturą metalu, temperaturą i naprężeniami.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.9

temperature – temperatura

stress/strein – naprężenia

strukture change – zmiany struktury

temperature-dependent phase transformation – zmiany fazowe zależne od temperatury

latent heat – ciepło utajone

thermal stres – naprężenia termiczne (rozszerzalność termiczna)

heat generation due to mechanical work – ciepło wydzielane w efekcie pracy mechanicznej

transformation stress and transformation plasticity - naprężenia i plastyczność wywołane transformacjami strukturalnymi

stress induced transformation – transformacje wywołane naprężeniami

5. Założenia systemu "HEARTS"

+++++ 5.1. Schemat elementów skończonych oraz metody numerycznych kalkulacji+++++

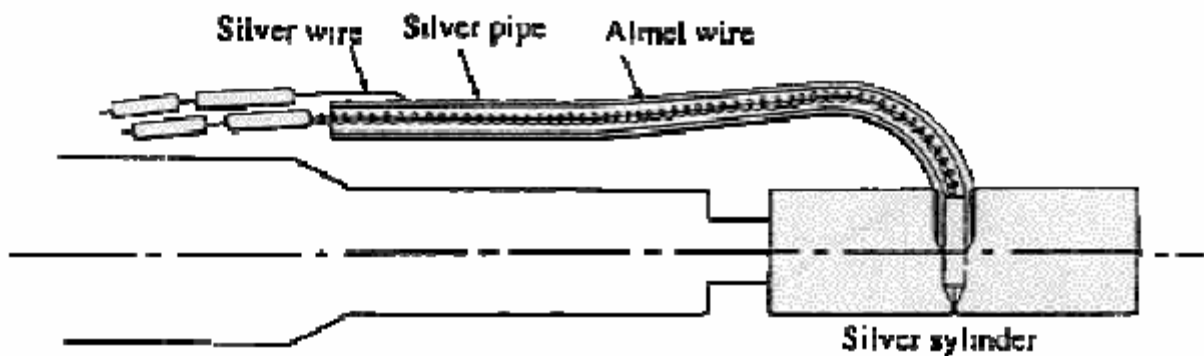
W tłumaczeniu pominięto szczegółowy opis budowy i zasad działania aplikacji modelującej.

Osoby zainteresowane tym zagadnieniem odsyłam do angielskiego tłumaczenia

6. Oznaczenie współczynnika przewodności cieplnej

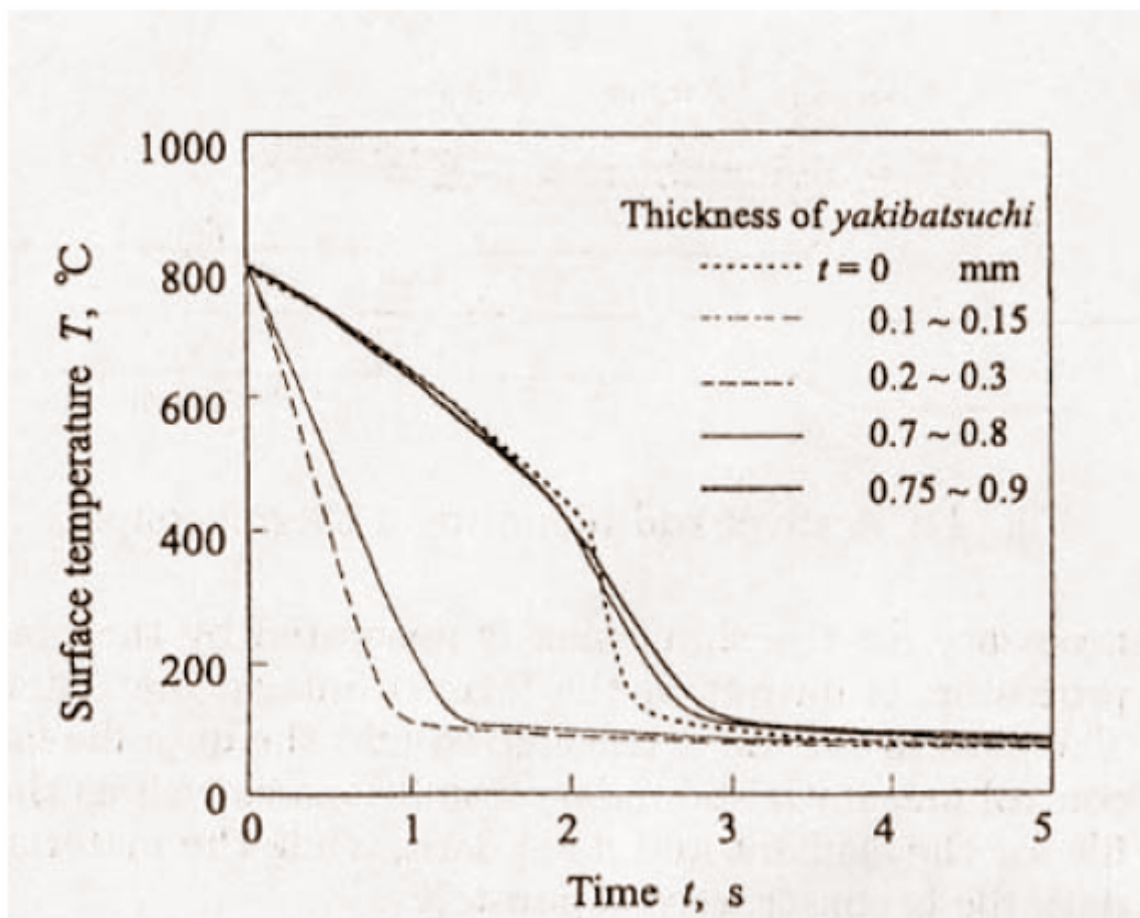
Przed hartowaniem na ostrze nakładana jest glina (*yakiba-tsuchi*), patrz **Rys.6**, w celu kontrolowania prędkości chłodzenia. Na potrzeby kalkulacji niezbędne było wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej w zależności od grubości warstwy gliny. Wykonano serię doświadczeń, opartych na Japońskich Normach Przemysłowych JISK2242, mających na celu wyznaczenie krzywej chłodzenia srebrnego cylindra pokrytego warstwą gliny o różnych grubościach. Użyto walca

wykonanego ze srebra, ponieważ srebro nie ulega przemianom strukturalnym w czasie nagrzewania i chłodzenia. Schemat montażu urządzenia pomiarowego **Rys.11**. Cylinder nagrzewano do temperatury 800 °C poczym chłodzono w wodzie.



Rys. 11 Schemat montażu urządzenia pomiarowego

Otrzymane krzywe chłodzenia przedstawiono na Rys.12 jako funkcję grubości warstwy glinki.



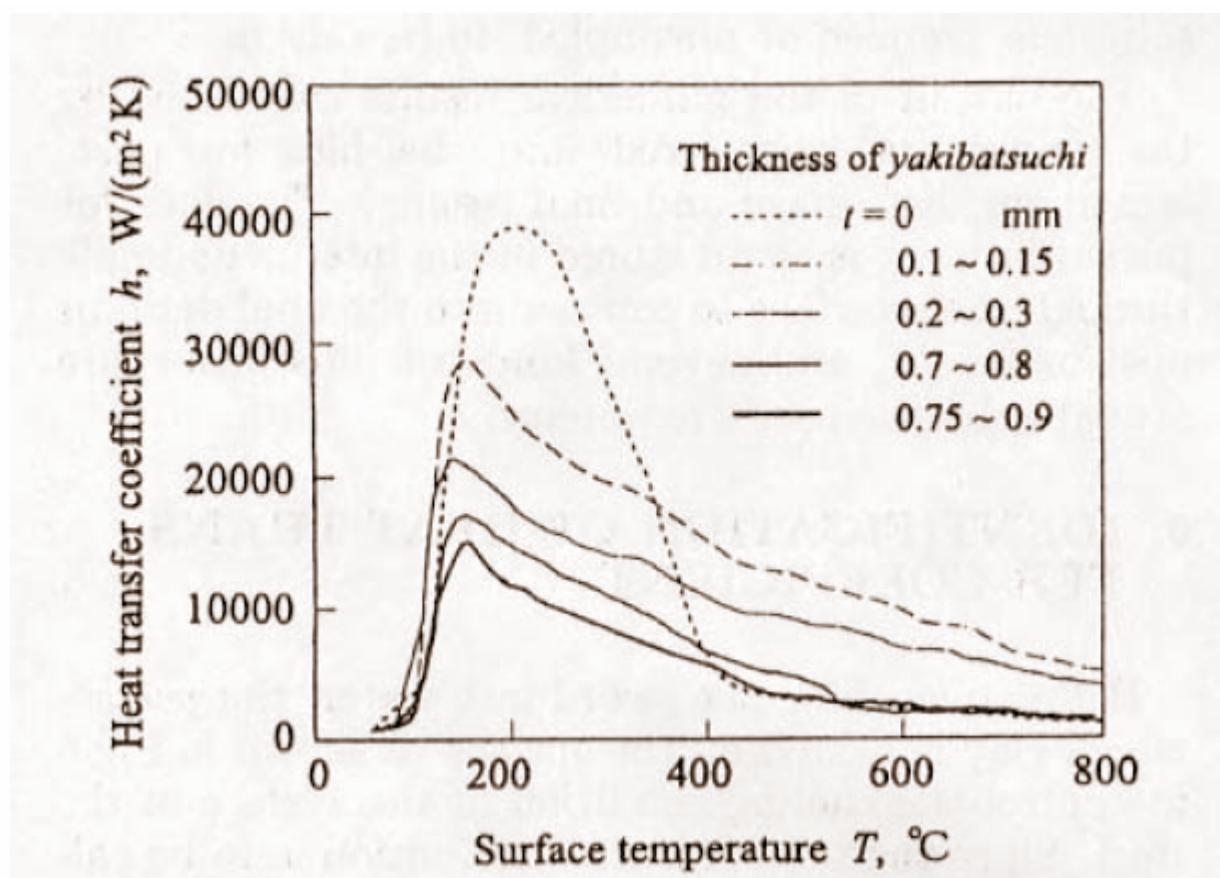
Rys. 12 Krzywe chłodzenia.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.12:

surface temperature – temperatura powierzchniowa
thickness of yakibatsuchi – grubość warstwy glinki
time – czas

Paradoksalne jest to, iż współczynnik przewodności cieplnej w przypadku cienkiej warstwy glinki jest większy niż przy całkowitym jej braku.

Prawdopodobnie związane jest to z tym że dana glina nie jest czystym Al_2O_3 , tylko zawiera jakieś minerały (sole, zasady), które podczas chłodzenia zwiększają zdolność chłodzenia przez wodę w danym zakresie temperatur. Jej niewielka ilość powoduje, że część tych związków rozpuszcza się w wodzie zwiększając jej szybkość chłodzenia, zbyt duża jej grubość bardzo spowalnia proces chłodzenia (częściowo rekompensowany przez dodatek minerałów) – wolny wniosek melona.



Rys. 13 Zależność współczynnika przewodności cieplnej od temperatury powierzchniowej.

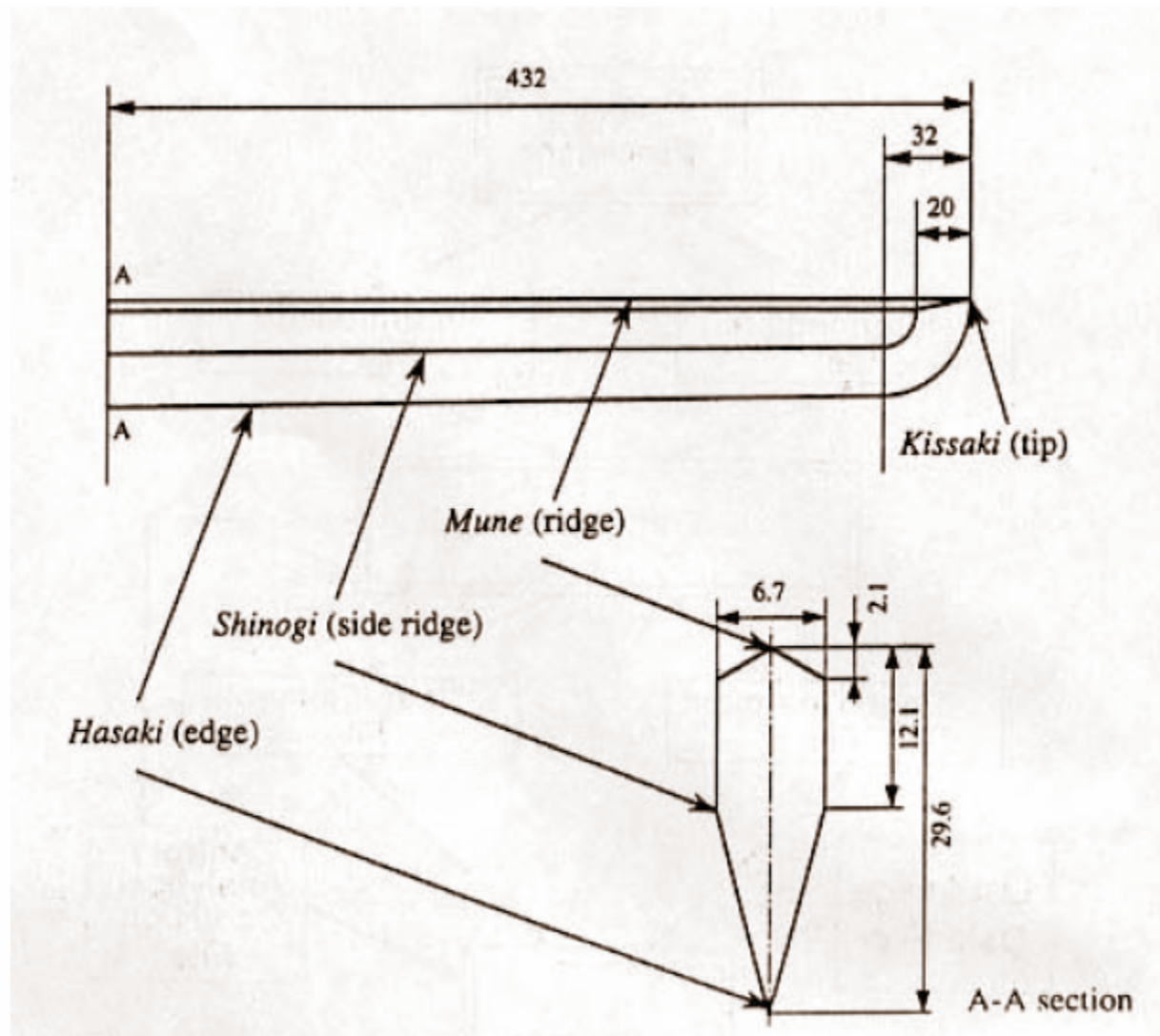
Tłumaczenie objaśnień do Rys.13:

heat transfer coefficient – współczynnik przewodności cieplnej
surface temperature – temperatura powierzchniowa
thickness of yakibatsuchi – grubość warstwy glinki

7. Wyniki symulacji

7.1. Model miecza i założenia symulacji

Pierwowzorem modelu był klasyczny, sławny miecz **Bizen-Osafune** (patrz Rys.14).



Rys. 14. Kształt i wymiary miecza.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.14:

mune (ridge) – grzbiet

kissaki (tip) – sztych

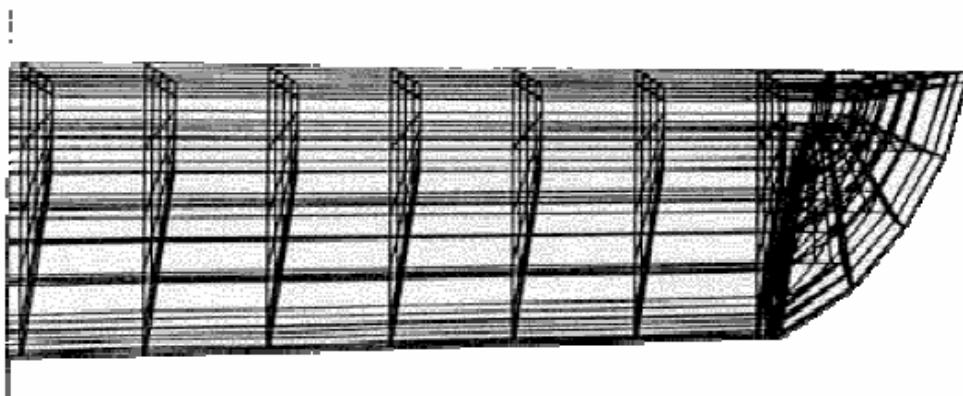
shinogi (side ridge) – boczna krawędź

hasaki (edge) – ostrze

Podział modelu na części do metody elementów skończonych (patrz **Rys.15**).



(a)Widok całego modelu.



(b)część przy *kissaki*.

Rys. 15. Schemat elementów skończonych.

Ilość elementów: 828, ilość węzłów 1230. Model podzielono na dwie części, (patrz **Rys.16(a)**), stal w rdzeniu o zawartości węgla 0,2% i stal okrywająca o zawartości węgla 0,65%, dla każdej części wprowadzono odrębne dane dotyczące materiału. Aby zróżnicować obszary o odrębnej przewodności cieplnej zależnej od grubości glinki powierzchnie główne podzielono na dwa obszary, dla których wprowadzono odrębne charakterystyki. Podział przedstawiono na **Rys.16(b)**.



(a) Two regions with different material property



(b) Two kinds of surface area with different heat transfer coefficient

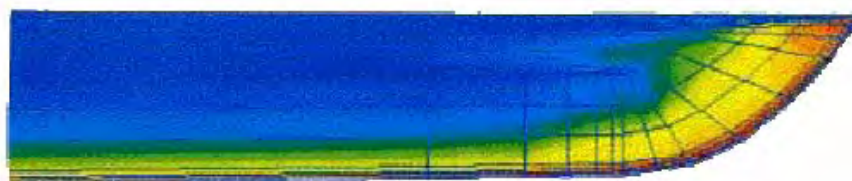
Rys. 16 Podział modelu na dwa rodzaje materiału o różnej zawartości węgla (a) i dwie powierzchnie o różnej przewodności cieplnej (b), zależnej od grubości warstwy glinki.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.16:

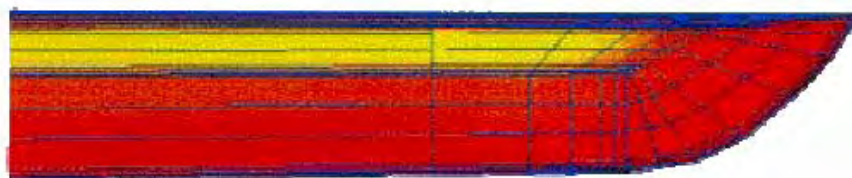
two regions with different material property – dwie części z różnych materiałów
two kinds of surface area with different heat transfer coefficient – dwa rodzaje powierzchni o różnych współczynnikach przewodności cieplnej

7.2. Efekt pokrycia klingi gliną o zróżnicowanej grubości.

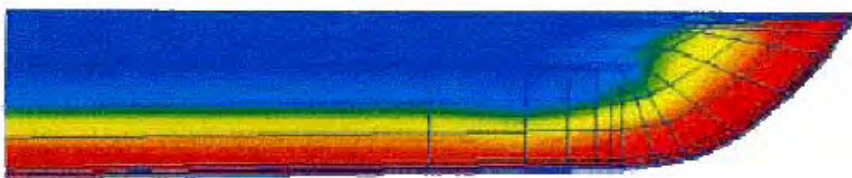
By poznać wpływ grubości warstwy gliny na **hamon** przeprowadzono kilka symulacji za każdym razem zwracając uwagę na innego charakteru zmiany. **Rys.17** przedstawia **procentowo ilość** martenzytu. Gdy ostrze jest pokryte grubą warstwą (0,8 mm) gliny, martenzyt nie występuje nigdzie oprócz ostrza (patrz **Rys.17(a)**), przez co **hamon** jest wąski. W przypadku pokrycia główki warstwą gliny o grubości 0,1 mm martenzyt występuje prawie na całej powierzchni (patrz **Rys.17(b)**). Optymalny rozkład **ilości** martenzytu występuje w przypadku pokrycia ostrza cienką warstwą gliny, a reszty ostrza warstwą grubą tak jak ma to miejsce przy tradycyjnym hartowaniu mieczy japońskich.



(a) With thick clay



(b) With thin clay



(c) With thick on the ridge
and thin on the edge



Rys. 17 **ilość** martenzytu w zależności od grubości gliny na ostrzu.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.17:

with thick clay – przy cienkiej warstwie gliny

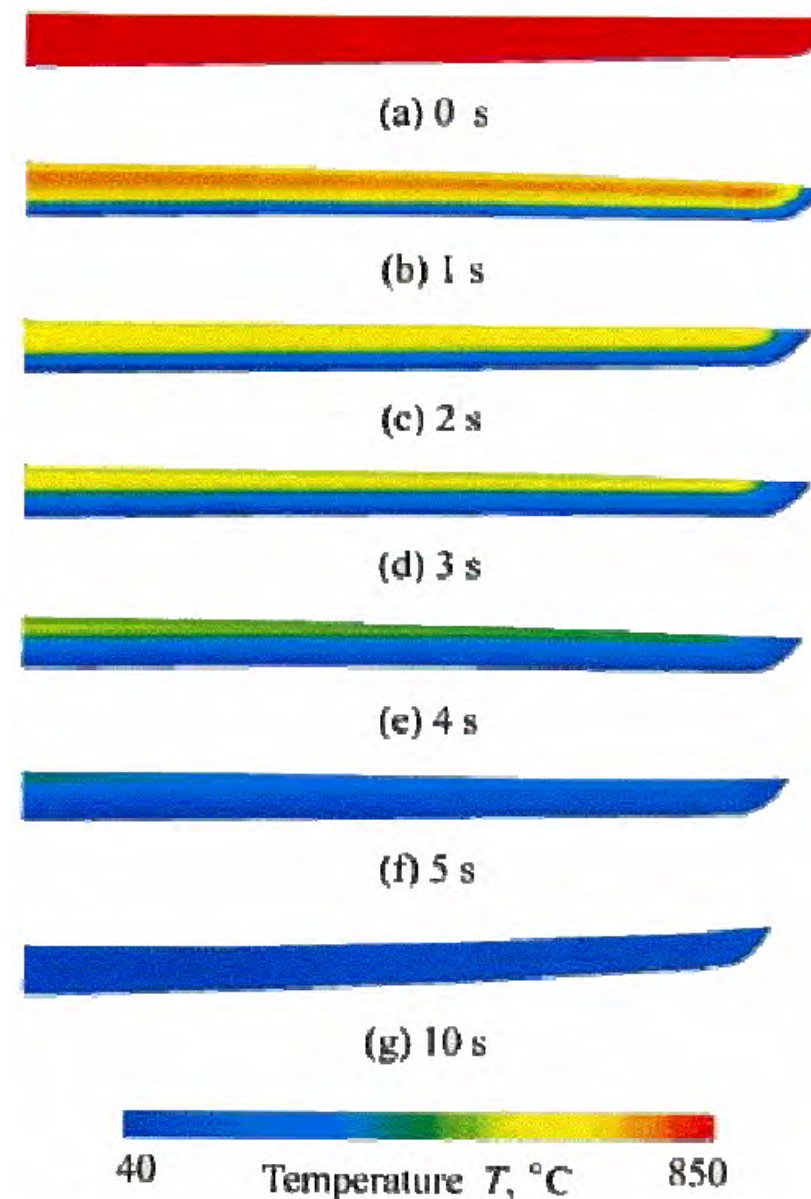
with thin clay – przy grubej warstwie gliny

with thick on the ridge and thin on the edge – przy cienkiej warstwie na ostrzu i grubej przy grzbiecie

volume fraction – zagęszczenie frakcji

7.3. Przebieg zmian struktury, temperatury, naprężeń i związane z nimi deformacje.

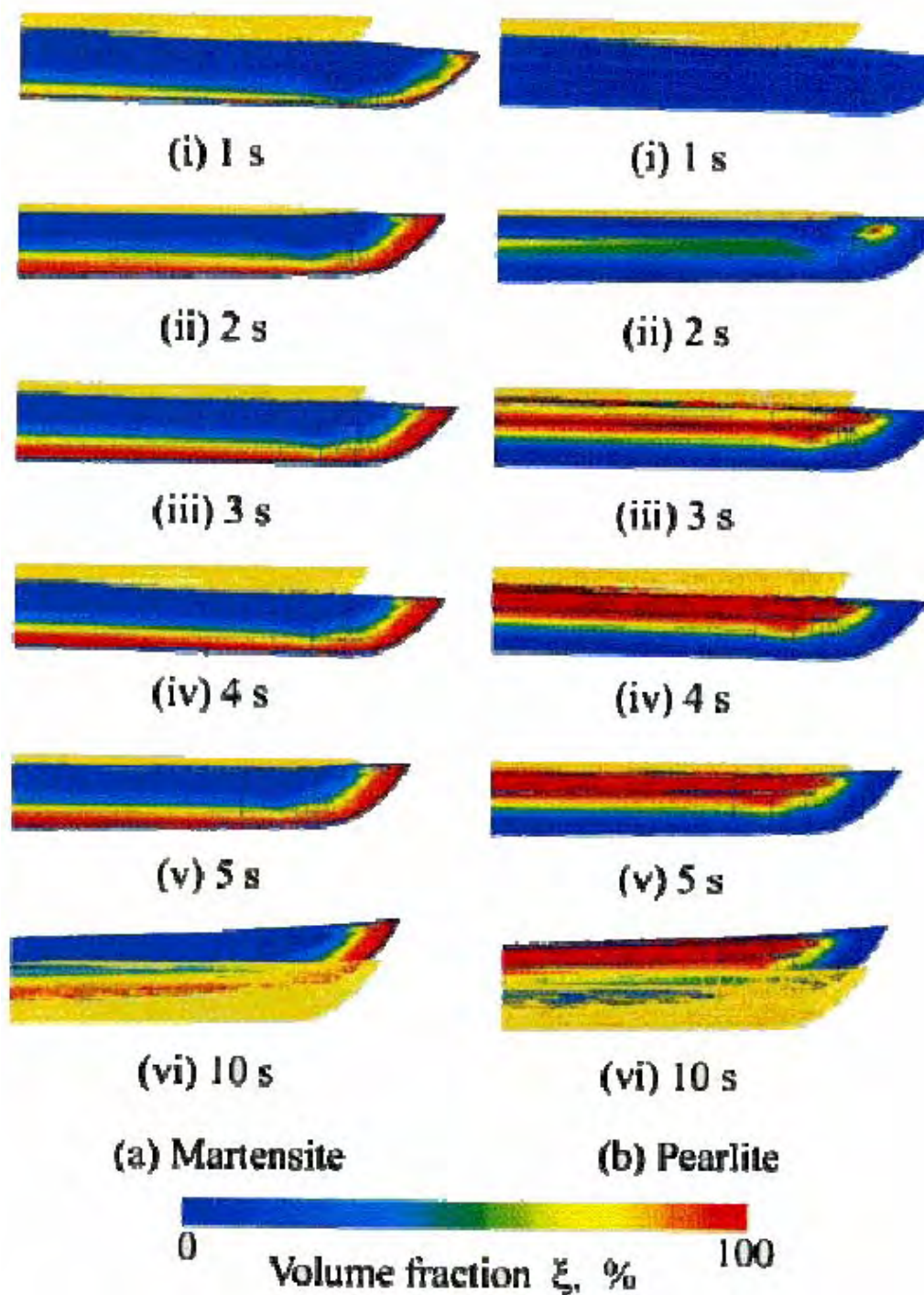
Rys.18 obrazuje zmiany rozkładu temperatur na mieczu w czasie chłodzenia oraz przebieg deformacji. Część miecza przy ostrzu kurczy się w wyniku odwróconego efektu rozszerzalności cieplnej, co prowadzi do wygięcia się ostrza w przeciwnym kierunku (*gyaku-sori*). Zjawisko to ma miejsce w pierwszej sekundzie (patrz Rys.18(b)).



Rys.18 Postęp deformacji w zależności od rozkładu temperatur.

Gdy zaczyna się transformacja **martenzytyczna** na skutek rozszerzania się struktury **martenzytycznej** tworzy się krzywizna (**sori**) (patrz **Rys.18(c)**) (**struktura martenzytyczna ma największą objętość wśród struktur stali**). Część ostrza pokryta grubszą warstwą glinki chłodzi się wolniej i co za tym idzie kurczy się także wolniej niż **hamon**, przez co występuje efekt tworzenia się przeciwnej krzywizny w stosunku do zamierzonej zwany **Gyaku-sori**. **Gyaku-sori** ma miejsce po raz drugi w 3 i 4 sekundzie, na skutek tworzenia się struktury perlitycznej, w obszarze **mune**. W końcowej fazie stygnąca stal przy **mune** kurczy się i tworzy się trwała krzywizna (**sori**).

Na **Rys.19** przedstawiono zmiany strukturalne zachodzące w czasie procesu hartowania.

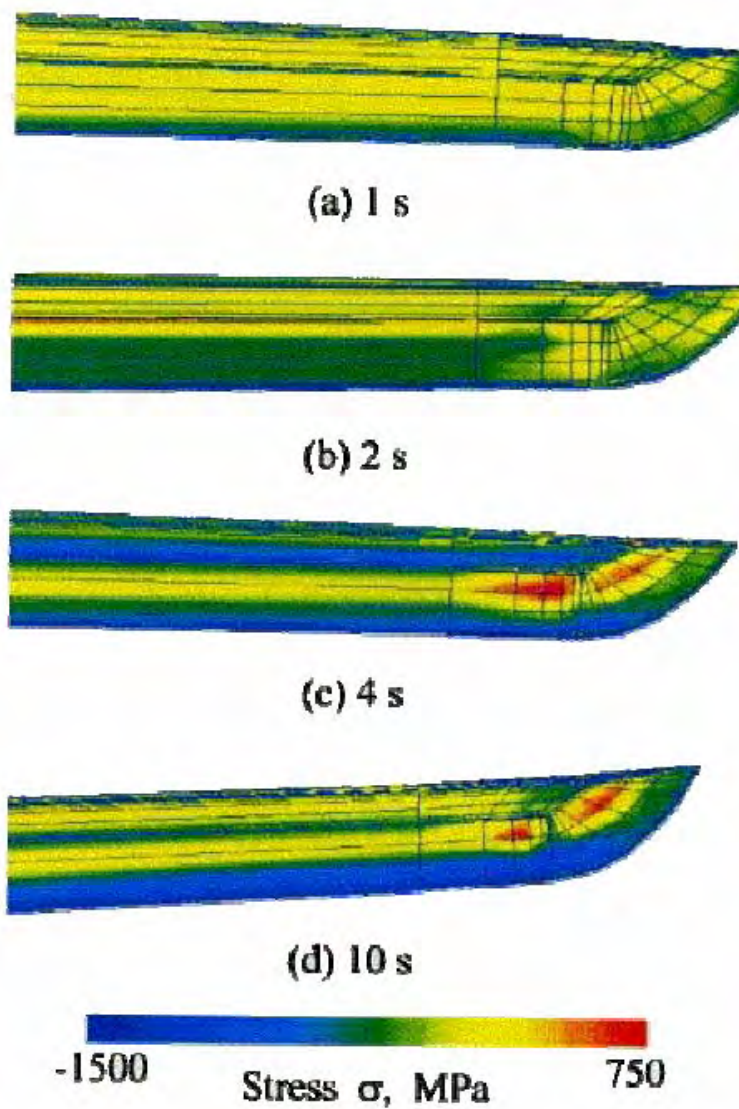


Rys. 19 Przebieg zmian struktury metalu w czasie.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.19:

volume fraction – procentowa zawartość struktury (fazy)

7.4. Rozkład naprężeń.



Rys. 20 Rozkład naprężeń.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.20:

stress – naprężenie

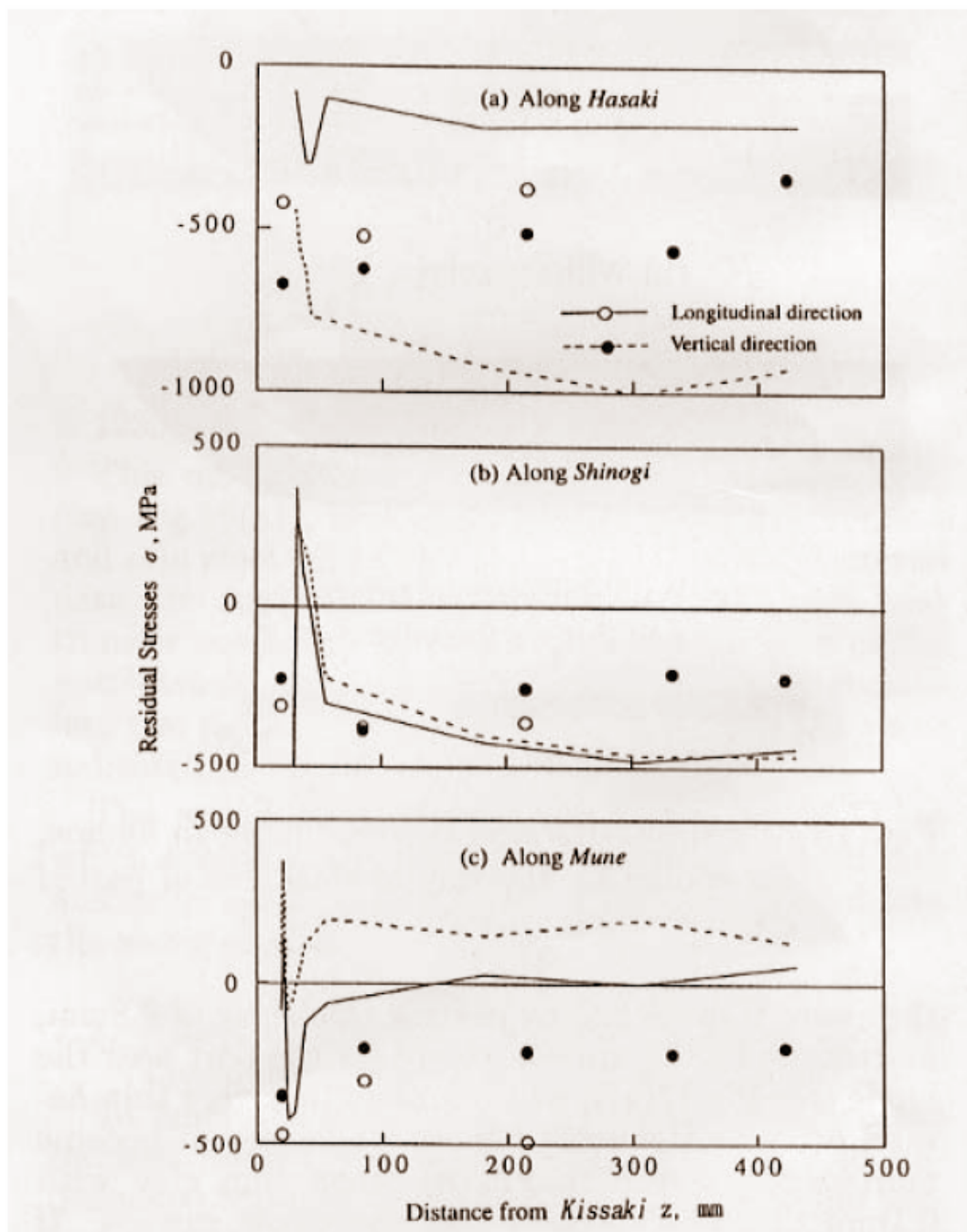


Fig. 21 Porównanie rzeczywistych naprężeń w mieczu z naprężeniami obliczonymi przez aplikację modelową.

Tłumaczenie objaśnień do Rys.21:

along – wzdłuż

residual stress – naprężenia trwałe

distance from *kissaki* – odległość od ***kissaki***

Maksymalne naprężenia występujące przy ***kissaki*** w czasie hartowania osiągają niemalże poziom naprężeń niszczących, dlatego też minimalne zaniedbanie często prowadzi do pęknięcia.