

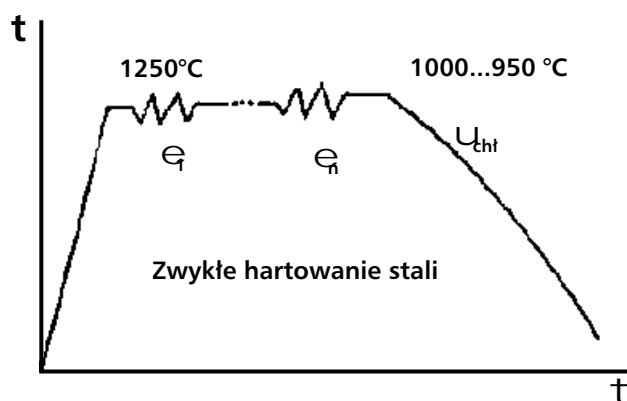
# Rzówj technologii regulowanego walcowania stali

prof. dr hab. inż. Jerzy Jeleńkowski  
Instytut Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie

W artykule przybliżono postępy dokonane w pracach nad rozwojem technologii regulowanej przeróbki plastycznej na gorąco, które doprowadziły do wytwarzania stali o wielofazowej strukturze z wymaganym udziałem, rozmieszczeniem i morfologią poszczególnych składników strukturalnych. Wymaga to odpowiedniego sterowania procesami zachodzącymi już podczas obróbki plastycznej na gorąco, w zakresie stabilności austenitu i kontrolowanego przebiegu chłodzenia w warunkach przemiany fazowej austenitu przechłodzonego. Wytwarzane obecnie w tej technologii stale, tzw. trzeciej generacji, wymienione w końcowej części publikacji, są stosowane na elementy konstrukcyjne wymagające połączenia wysokiej wytrzymałości i plastyczności, zdolne do pochłaniania energii w warunkach odkształcenia plastycznego z dużymi prędkościami. Obecnie regulowane walcowanie, obok hartowania izotermicznego na bainit dolny, jest też jednym z finalnych zabiegów obróbki stali konstrukcyjnych wysokowęglowych oraz narzędziowych zarówno do pracy na zimno jak i szybkochnących.

Na początku lat 30-tych ubiegłego wieku w wielu krajach rozpoczęto prace nad wykorzystaniem ciepła użytego do nagrzania stalowej lub staliwnej przygotówki (slabu) walcowanej na gorąco do bezpośredniego zwykłego hartowania. Ten sposób obróbki nazwano „hartowaniem z temperatury walcowania” (rys. 1). Temperaturę początku jak i końca walcowania, wg tej technologii, ustalano w zależności od właściwości materiału użytych walców, a szybkość chłodzenia dobierano odpowiednio do konstrukcji i prędkości ruchu transportera rolkowego.

Znaczny postęp w obróbce plastycznej na gorąco dokonał się, gdy ustalano stopień odkształcenia walcówki i czas od ostatniego gniotu do początku chłodzenia – parametry które we wcześniejszych pracach nie były kontrolo-

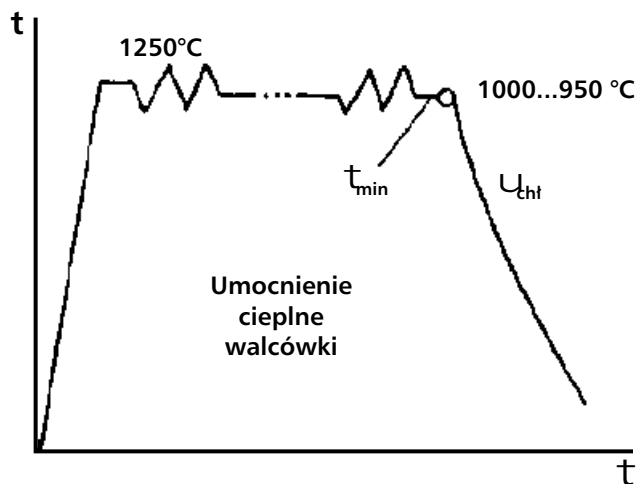


Rys. 1. Schemat walcowania na gorąco stali ze zwykłym hartowaniem po kilku gniotach wykonanych w przedziale temperaturowym 1000–950°C

wane (rys. 2). Główną uwagę zwracano na możliwości chłodzenia walcówki bezpośrednio w wodzie z ewentualnym uprzednim podgrzaniem.

W końcu lat 30-tych XX wieku wyjaśniono wpływ temperatury końca walcowania na mechaniczne właściwości hartowanej stali, tj. na uzyskiwane wartości: granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, względne

tyczną (WOCP) (rys. 4) i jej odmianę niskotemperaturową obróbkę cieplno-plastyczną (NOCP). Otworzyło to nowe możliwości zmniejszenia materiało- i energochłonności konstrukcji. We wszystkich odmianach obróbki cieplno-plastycznej głównym zadaniem jest wytworzenie, w odkształcanym w zakresie stabilności (pierwotnym, równowagowym austenicie (WOCP) lub przechłodzonym austenicie (NOCP), dużej ilości defektów struktury krystalicznej

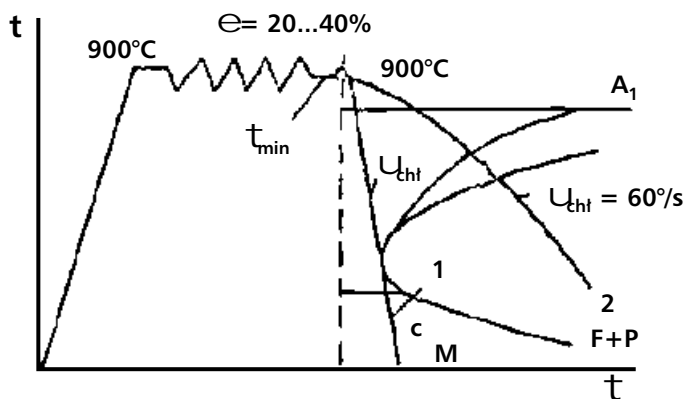


Rys. 2. Schemat sposobu hartowania stali, w którym w ostatnim gnioście ustalano stopień odkształcenia i temperaturę oraz czas upływający do chłodzenia w wodzie

wydłużenie, przewężenie i udarność. Technologię tę nazwano termomechaniczną obróbką cieplną lub obróbką cieplno-plastyczną. Początkowo zastosowano ją do stali konstrukcyjnych (maszynowych) o zawartości od 0,3 do 0,5% C. Rozwój tej technologii umożliwił seryjną produkcję części maszyn, przy minimalnym paczeniu się wyrobów, czystości powierzchni, itd. Niedostatkami było przeciążenie walców przy dążeniu do obniżania temperatury końca walcowania, co jak doświadczano poprawiało istotnie właściwości stali, jednak utrudniło cięcie walcówki, zabiegi odpuszczania dla zmniejszenia naprężeń, oczyszczenie powierzchni przed następną operacją, a przede wszystkim niekorzystnie wpływało na eksploatację walców. Brakowało wiedzy o istocie wpływu naprężenia i odkształcenia na zmiany strukturalne w odkształcanym austenicie, które decydują o właściwościach produktów jego rozpadu.

Badania i analiza tych zagadnień wniosły istotny wkład w rozwój tej technologii. Określono bowiem korzystny rodzaj substruktury austenitu w końcowym etapie walcowania i warunków temperaturowo-czasowych chłodzenia (rys. 3). Umacniano walcówkę bezpośrednim szybkim chłodzeniem po ostatnim gnioście, przez co poprawiano właściwości struktury austenitu nadawane w ostatnim nacisku walców i przekazywane ich strukturze powstałej po jego przemianie.

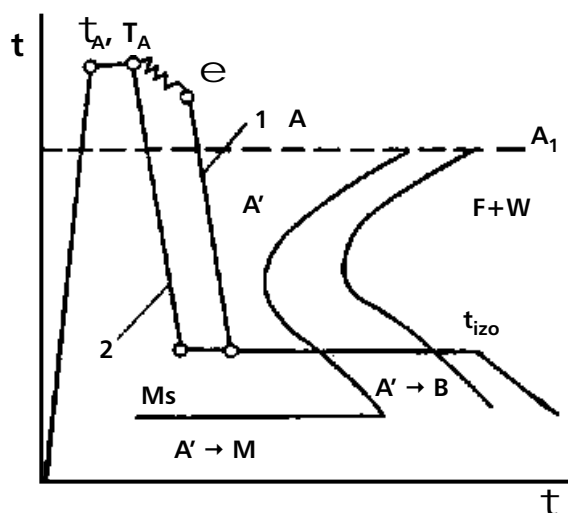
Dużym kolejnym osiągnięciem technologii obróbki cieplno-mechanicznej, zwłaszcza stali niskowęglowych stosowanych na wiele konstrukcji w budownictwie, okazała się możliwość umocnienia walcówki w technologii walcownictwa zwanej wysokotemperaturową obróbką cieplno-plastyczną



Rys. 3. Schemat wysokotemperaturowej obróbki cieplno-plastycznej, z dokładną kontrolą temperatury końca walcowania i czasu po ostatnim gnioście, po którym walcówka trafiała na przeciwnie skierowany do jej ruchu strumień wody. Oznaczenia: F – ferryt; P – perlit; M – martenzyt

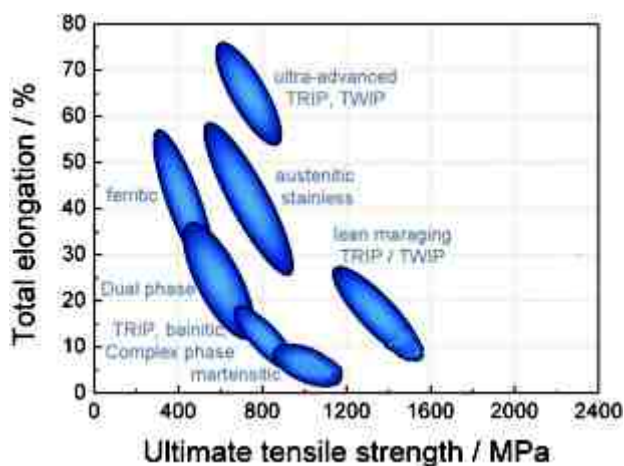
licznej tzn. rozwiniętą substrukturę. Było to możliwe po wykorzystaniu zaawansowanej wiedzy o przemianach fazowych uformowanej w austenicie substruktury, i w zależności od potrzeb, dziedziczeniu jej przez perlit, martenzyt, bainit i struktury post martenzytyczne.

Dalszym etapem w rozwoju termoplastycznego umocnienia było opracowanie technologii kontrolowanego walcowania stali niskostopowych bez stosowania zabiegu ulepszania



4. Schemat wysokotemperaturowej obróbki cieplno-mechanicznej stali kończącej się chłodzeniem na wymaganą strukturę i substrukturę: ferrytu, ferrytu z perlitem, perlitu, bainitu względnie martenzytu. Oznaczenia: 1 – WOCP; 2 – NOCP; A – austenit; A' – austenit przechłodzony; B – bainit (dolny); M – martenzyt

cieplnego. W pierwszym etapie było otrzymanie z rozdrobnionej struktury austenitu bardzo drobnego ziarna ferrytu po walcowaniu przy obniżonych temperaturach (NOCP, i jej odmiany ausforming). Było to możliwe po scharakteryzowaniu budowy substruktury austenitu i innych kompleksowych przemian w stali podczas odkształcania na ciepło, co istotnie zmieniło dotychczasowy pogląd w tej dziedzinie. Sukces tej obróbki zależy od temperatury, stopnia i prędkości odkształcania austenitu zwłaszcza przechłodzonego, procesu dynamicznego zdrowienia i dynamicznej rekrytalizacji oraz obecności i oddziaływania dyspersyjnych cząstek węglików, azotków, węglikoazotków oraz dynamice wzrostu ziarna austenitu i szybkości jego rozpadu.



5. Przykładowe właściwości stali mikrostopowych, trzeciej generacji, o obniżonej zawartości węgla stosowane w wielu obszarach zastosowań

Finalny wymiar ziarna ferrytu, bainitu (dolnego) i martenzytu, utworzonego z rozdrobnionego odkształcaniem austenitu, zależy od temperatury. Im jest ona niższa tym uzyskuje się mniejsze rozmiary ziaren i od obecności dyspersyjnych faz wydzielonych się z austenitu. Ujawniono niezwykle korzystny wpływ na właściwości stali mikrododatków m. in. Takich pierwiastków jak Nb, V i Ti, które hamują proces rekrytalizacji austenitu, a po jego rozpadzie umacniają ferryt lub bainit.

Przykładem są pierwsze historycznie niskostopowe wysokowytrzymałe ferrytyczne i ferrytyczno-bainityczne stale (HSLA), które po kontrolowanym walcowaniu, kończącym się przy obniżonej temperaturze, uzyskują wartość umownej granicy plastyczności (lub  $R_e$ ) w granicach od 450 do 560 MPa i temperaturę proggu kruchości – 110°C. Dobra odporność na pękanie uzyskiwana w wyniku realizacji tej technologii umożliwiła postęp w budowie jednostek pływających o bardzo dużej wyporności i konstrukcji pracujących w strefie wiecznej zmarzliny, kriogenice i w wysokościowym budownictwie.

Opracowanie stali HSLA było rozwiązaniem jednego z najważniejszych problemów metalurgii w poszukiwaniu stali do zastosowania na rurociągi przesyłowe na dalekiej

północy. Z nagromadzonej wiedzy z obszaru podstaw nauki o materiałach należało:

1. Dobrać ilość mikrododatków stopowych Nb, V, Ti rozdrabniających i umacniających wydzieleniowo ziarna ferrytu i rozwiązać trudności we wzajemnym ich oddziaływaniu na ilość i rozmieszczenie faz umacniających w austenicie i ferrycie.
2. Opracować parametry obróbki cieplno-mechanicznej w zakresie stabilności austenitu oraz austenityczno-ferrytycznym niezbędnych do określenia warunków walcowania: temperaturę, stopień odkształcenia i szybkość chłodzenia.
3. Zminimalizować zawartość węgla i związane z tym procesy utlenienia i redukcji podczas zabiegów metalurgicznych (dodano dodatki metali ziem rzadkich).
4. Rozwiązać zagadnienie optymalizacji anizotropii (zwiększenia lub zmniejszenia) właściwości wytrzymałościowych w elementach konstrukcyjnych, a zwłaszcza pasowości struktury (z różnych powodów).

W przypadku materiałów na rurociągi jak i w budownictwie wysokościowym ważny jest dobór granicy plastyczności i dobrej wiązkości. Istotne jest zachowanie się materiału pod obciążeniem, niszczenia korozyjnego, a głównie wpływ składników strukturalnych na: zarodkowanie i rozwój pęknięć, morfologię przelomu, plastyczność, w zależności od drobnoziarnistości, stabilności struktury pod wpływem naprężeń sprężystych i ich relaksacji.

Technologią tą bardziej przemyślaną otrzymuje się ostatnio stale węglowe i niskostopowe z nanobainitem, a w stalach narzędziowych do pracy na zimno martenzyt z nanoaustenitem, w obydwóch przypadkach o unikatowych właściwościach.

Podsumowując, doświadczenia wielu pokoleń badaczy; metalurgów i konstruktorów zaowocowały nowymi gatunkami stali, tzw. trzeciej generacji, niektóre z nich o nazwach stosowanych w języku angielskim są zaprezentowane na rys. 4.

## Literatura

1. Dyja H., Gałkin A., Knapieński. M.: Reologia metali odkształcalnych plastycznie. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa, 2010.
2. Gabryszewski Z., Gronostajski J.: Mechanika procesów obróbki plastycznej. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1991.
3. Przetwórstwo metali. Plastyczność a struktura, pod red. E. Hadasika, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2006.
4. Tushinsky L.I.: Metall alloys strengthening theory and technology. Ed. Novosibirsk, Nauka, 1990.
5. Jeleńkowski J.: Austenit szczątkowy w stalach węglowych i stopowych. *Obróbka metalu*. 1/2015, s. 14-18. ■