

*Fryderyk Staub, Stanisław Przegaliński  
Jerzy Janicki, Jerzy Tymowski*

Katedra Metaloznawstwa

## **Porównanie wyników hartowania izotermicznego i ulepszania cieplnego na przykładzie kilku stali konstrukcyjnych**

W pracy omówiono własności uzyskiwane w stalach konstrukcyjnych po hartowaniu izotermicznym<sup>1)</sup>, rozważając celowość zastępowania tą obróbką zwykłego hartowania z odpuszczaniem. Podano wyniki badań przeprowadzonych dla kilku krajowych stali stopowych (40H, 37HS, 35HM, 36HNM). Ustalono dla tych stali warunki, w których wprowadzenie hartowania izotermicznego może być korzystne, przy czym jako kryterium oceny przyjęto ciągliwość, określaną wielkością udarności przy stałej twardości lub przewężeniem przy stałej wytrzymałości.

### **1. Cel pracy**

Hartowanie izotermiczne albo tzw. ulepszanie jednozabiegowe pojawiło się jako nowy rodzaj obróbki cieplnej w latach 1931 — 1935 w wyniku badań, zapoczątkowanych przez E. S. Davenporta i E. C. Baina [1].

Hartowanie izotermiczne jako metoda obróbki cieplnej stali konstrukcyjnych, nie było dotychczas szerzej wykorzystane. Przyczyną tego stanu rzeczy były przede wszystkim trudności technologiczne wywołane dużymi wymiarami przedmiotów i znaczną na ogół krytyczną szybkością oziębiania stali konstrukcyjnych. Ponadto bardzo istotne znaczenie miało tutaj nie wyjaśnione dotychczas całkowicie zagadnienie własności wytrzymałościowych uzyskiwanych przy hartowaniu izotermicznym w porównaniu z własnościami stali ulepszonych w zwykły sposób.

Zagadnieniu temu poświęcono dotychczas wiele prac, otrzymane wyniki są jednak dość rozbieżne, a niekiedy wręcz sprzeczne ze sobą. Pierwsze badania przeprowadzone w latach 1930—1931 na kilku stalach

---

<sup>1)</sup> Według PN/H-01200 właściwym określeniem zabiegu jest „hartowanie z przemianą izotermiczną”, pomimo to posłużono się terminem „hartowanie izotermiczne”, jako powszechnie używanym.

stopowych używanych w przemyśle samochodowym wykazały, że przy hartowaniu izotermicznym osiągnąć można wysoką udarność, przewyższającą znacznie wartości uzyskiwane przy ulepszaniu cieplnym na tę samą wytrzymałość. W dalszych badaniach jednak niejednokrotnie stwierdzano, że hartowanie izotermiczne powoduje spadek udarności i pogorszenie się innych własności mechanicznych (szczególnie granicy sprężystości i granicy plastyczności).

Liczne przypadki nieudanych prób zastosowania hartowania izotermicznego w przemyśle jak i pewne wady związane z przyjętą technologią obróbki (mała głębokość hartowania występująca przy chłodzeniu w spokojnych kąpielach w wannach starej konstrukcji jak i na przykład znaczny rozrzut wyników twardości i wytrzymałości) spowodowały, że początkowe wielkie zainteresowanie nową metodą obróbki, w odniesieniu do stali konstrukcyjnych bardzo szybko osłabło.

Dopiero w ostatnich latach w wyniku systematycznych badań, zmierzających z jednej strony do powiązania własności metali z ich strukturą, z drugiej zaś poszukujących nowych sposobów polepszania tych własności, zagadnienie przydatności hartowania izotermicznego poczęło się wyjaśniać. Przyczyniło się do tego również rozszerzenie metod oceny konstrukcyjnej przydatności materiału, wprowadzenie badań wytrzymałościowych przy różnych sposobach obciążenia (statycznych, dynamicznych, zmiennych), badań przy złożonych stanach naprężeń, jak również badań określających zachowanie się materiału przy nierównomiernym rozkładzie naprężeń (jak np. ocena wrażliwości na działanie karbu).

Dzięki badaniom, zmierzającym do ścisłego określenia własności poszczególnych składników strukturalnych powstających przy obróbce izotermicznej i przy ulepszaniu, zagadnienie własności wytrzymałościowych stali konstrukcyjnych hartowanych izotermicznie ujmowane jest coraz ściślej. Obecnie można przyjąć, że hartowanie izotermiczne z przemianą w dolnej części zakresu bainitycznego w przypadku większości stopowych stali konstrukcyjnych daje dobrą udarność przy podwyższonej jednocześnie wytrzymałości postaciowej części maszyn.

W pewnym zakresie wysokich twardości i wytrzymałości własności te przewyższają własności osiągane przez zwykłe hartowanie i odpuszczanie. Im wyższa natomiast temperatura obróbki izotermicznej (powstawania bainitu), tym niekorzystniej wypadają własności materiału w porównaniu z własnościami stali o strukturze troostytu czy sorbitu.

Spostrzeżenia te oparte są jednak przeważnie na badaniach fragmentarycznych, które objęły tylko niewielką ilość gatunków stali. Wprawdzie zgodność otrzymywanych wyników pozwala już na wyciąganie ogólniejszych wniosków, jednak brak jest jeszcze dokładniejszych informa-

cji dla wielu gatunków przemysłowych. Dotyczy to zwłaszcza stali używanych obecnie w kraju.

Brak jest również danych pozwalających na wyciągnięcie bardziej ogólnych wniosków o wpływie dodatków stopowych na własności struktur bainitycznych. Trudności spowodowane są tu w głównej mierze tym, że do chwili obecnej nie wyjaśniono właściwie, jakim przyczynom przypisać należy występowanie po hartowaniu izotermicznym znacznej plastyczności przy wysokich jednocześnie własnościach wytrzymałościowych. W tych warunkach staje się konieczne dalsze gromadzenie materiału liczbowego, charakteryzującego możliwie dokładnie własności stali konstrukcyjnych ulepszanych cieplnie i hartowanych izotermicznie. Uzyskanie takiego materiału mogłoby się przyczynić do szerszego stosowania hartowania izotermicznego stali konstrukcyjnej, tym bardziej że technologia poczyniła ostatnio również duże postępy zwiększając możliwości stosowania tego zabiegu.

Jak wspomniano, jednym z czynników utrudniających szersze wprowadzenie hartowania izotermicznego do praktyki przemysłowej była, obok niepowtarzalności wyników obróbki, mała głębokość hartowania występująca przy chłodzeniu w gorących kąpielach. I tak na przykład największa średnica równomiernej obróbki cieplnej dla stali zawierającej  $0,6 \div 0,7\%$  C i  $0,6 \div 0,9\%$  Mn wynosi przy hartowaniu zwykłym około 30 mm, przy hartowaniu izotermicznym zaś w normalnych warunkach tylko 4,7 mm [2]. Przy większych przekrojach obrabianych przedmiotów powstają w rdzeniu struktury niejednorodne, które w pewnych przypadkach mogą powodować znaczną kruchość.

Ulepszenie technologii obróbki przez wprowadzenie wanien solnych z intensywnym krążeniem kąpeli, zastosowanie wodnych lub olejowych kąpeli wstępnych jak również zastąpienie w pewnych przypadkach kąpeli saletranych stopionymi ługami pozwoliło w ostatnich latach na znaczne zwiększenie głębokości hartowania przy obróbce izotermicznej, zwiększając tym samym możliwość jej stosowania do stali konstrukcyjnych przemysłowych. Można tu wspomnieć, że na przykład przy stali chromowo-molibdenowej, o zawartości  $0,35\%$  C,  $0,27\%$  Si,  $0,61\%$  Mn,  $1,12\%$  Cr,  $0,22\%$  Mo i  $0,18\%$  Ni, zastosowanie wstępnego oziębiania w wodzie lub oleju pozwoliło na uzyskanie jednorodnych struktur bainitycznych w przedmiotach o średnicy 60, a nawet do 80 mm [3].

Poprawiła się również powtarzalność wyników, mimo że przy stałych warunkach obróbki rozrzut własności jest jeszcze znacznie większy niż przy ulepszaniu cieplnym.

Należy podkreślić, że jedną z zasadniczych zalet hartowania izotermicznego jest częściowe, a niekiedy nawet prawie całkowite uniknięcie

naprężeń wewnętrznych i odkształceń wywołanych przy hartowaniu zwykłym przemianą martenzytyczną. Stąd hartowanie izotermiczne może być wskazane przy obróbce przedmiotów, gdzie konieczne jest zachowanie pierwotnych kształtów i wymiarów, a więc przy obróbce smukłych wałków, wrzecion, sprawdzianów itp. Można również w ten sposób uniknąć pęknięć przy hartowaniu przedmiotów o złożonych kształtach i zmiennych przekrojach. Ta okoliczność, niezależnie od otrzymywanych własności, przyczynia się znacznie do wprowadzenia hartowania izotermicznego do obróbki cieplnej narzędzi, obok często stosowanego hartowania stopniowego.

Wobec otwierających się przed obróbką izotermiczną nowych możliwości tym wyraźniejsza staje się konieczność rozszerzania i uogólnienia posiadanych danych doświadczalnych i przeprowadzania w tym celu dalszych badań nad powiązaniem składu chemicznego i struktury z własnościami mechanicznymi stali.

Praca niniejsza została zamierzona jako przyczynek do tych badań. Badanie objęło cztery stale z bieżącej produkcji krajowej, przy czym porównanie własności użytkowych po różnych sposobach obróbki przeprowadzono zasadniczo na podstawie badań udarności. Wartość prób udarności jako sprawdzianu zachowania się materiału w rzeczywistych warunkach pracy może być tematem dyskusji. Była to jednak metoda najprostsza, pozwalająca na otrzymanie pewnych wniosków nawet przy ograniczonych środkach stojących do dyspozycji w naszych słabo wyposażonych laboratoriach.

## 2. Omówienie wyników dotychczasowych badań

Zestawienie wyników licznych prac dotyczących stopowych stali konstrukcyjnych o zawartości 0,3 — 0,5% C pozwala już na przeprowadzenie pewnych porównań własności uzyskiwanych przy hartowaniu izotermicznym i ulepszaniu cieplnym.

Wyraźną zaletą stali hartowanych izotermicznie jest duża plastyczność w zakresie wysokich twardości i wytrzymałości, uzyskiwanych po przemianie w obszarze dolnego bainitu. Plastyczność ta wyraża się zarówno znaczną udarnością, jak i wysokimi wartościami przewężenia. I tak np. w stali 30 HGSA po hartowaniu izotermicznym w 370° C otrzymuje się twardość około 45 H<sub>RC</sub> i udarność około 11 kGm/cm<sup>2</sup>, natomiast po zwykłym hartowaniu i odpuszczeniu na tę samą twardość udarność jest przeszło 2,5-krotnie niższa (około 4 kGm/cm<sup>2</sup>). Po tej samej obróbce izotermicznej przewężenie wynosi około 45% przy wytrzymałości 140 kG/mm<sup>2</sup> [4].

Ze wzrostem temperatury przemiany izotermicznej, a tym samym ze spadkiem twardości, następuje pogarszanie się udarności. w porównaniu z wartościami uzyskiwanymi po hartowaniu i odpuszczaniu. W zakresie twardości odpowiadających zwykle stosowanemu ulepszaniu stali konstrukcyjnych (z odpuszczaniem w temperaturach  $250 \div 600^\circ \text{C}$ ) stal poddana hartowaniu izotermicznemu wykazuje najczęściej zwiększoną kruchość spowodowaną występowaniem bardziej zróżnicowanych struktur, jak również — przy niezupełnej przemianie — często obecnością martenzytu. Fakt ten, przy bezkrytycznych próbach wprowadzenia metody do przemysłu, przyczynił się niekątpliwie znacznie do powstawania opinii ujemnych o tego rodzaju obróbce.

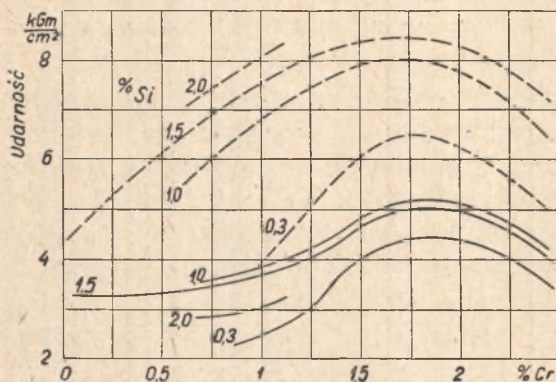
Przyczyn występowania większej udarności w zakresie wysokich twardości przy hartowaniu izotermicznym niż przy ulepszaniu nie można jeszcze obecnie podać. Na ogół przypuszcza się, że naprężenia strukturalne powstające w stali przy hartowaniu na martenzyt powodują powstanie mikropęknięć, których wpływ zanika dopiero w wysokich temperaturach odpuszczania. Podczas przemiany bainitycznej ze względu na mniejsze naprężenia strukturalne niebezpieczeństwo powstawania mikropęknięć jest mniejsze, w wyniku czego osiąga się wyższą udarność [5].

Według innych poglądów [6] różnice te powstają dzięki uniknięciu przy hartowaniu izotermicznym zjawiska kruchości odpuszczania. Wydaje się to tym bardziej prawdopodobne, że stwierdzono pewną zależność między wielkością zakresu twardości, gdzie stosowanie hartowania izotermicznego jest celowe, a szerokością strefy kruchości charakterystycznej dla danej stali przy odpuszczaniu. I tak na przykład dla stali 30 HGSA, odznaczającej się dużą szerokością strefy kruchości odpuszczania, hartowanie izotermiczne daje korzystniejsze niż przy hartowaniu i odpuszczaniu, wartości udarności w zakresie  $H_{RC} = 35 \div 48$ . W stalach mniej skłonnych do kruchości odpuszczania zakres ten zwęża się, przesuwając się w kierunku wyższych twardości i wytrzymałości. Celowość stosowania obróbki izotermicznej uzależniona jest więc od składu chemicznego stali. Jako przykład na rys. 1 podano porównanie udarności stali, zawierającej poza 0,5% C, 0,6% Mn i 0,15% V, różne ilości chromu i krzemu [7].

Należy zaznaczyć, że hartowanie izotermiczne w zakresie wyższych temperatur przemiany może powodować wyraźne obniżenie granicy sprężystości i plastyczności. Na przykład w stali 30 HGSA po obróbce izotermicznej otrzymuje się wartości  $R_s$  i  $R_{p1}$  o  $20 \div 30\%$  niższe niż po hartowaniu zwykłym i odpuszczeniu na tę samą wytrzymałość [4].

Początkowo dla wytłumaczenia tego zjawiska przyjmowano pogląd wyrażony przez J. H. Hollomona [8,9], że struktury płytkowe, do któ-

rych należy również i bainit, odznaczają się znacznie niższym stosunkiem  $\frac{R_{pl}}{R_r}$  niż struktury o cementycie ziarnistym. Okazuje się jednak, że zjawisko to występuje przede wszystkim w tych stalach, w których po obróbce pozostają w strukturze większe ilości austenitu szczątkowego. Podaje się [10], że w tej samej stali zarówno umowna granica sprężystości (przy wydłużeniu 0,01%), jak i granica plastyczności (0,2%) ulegają stałemu wzrostowi w miarę zmniejszania się ilości szczątkowego austenitu.



Rys. 1. Wpływ zawartości chromu i krzemu na udarność w stali o zawartości 0,5% C, 0,6% Mn, 0,15% V, po ulepszeniu cieplnym (linie ciągłe) oraz po hartowaniu izotermicznym (linie kropki-kreskowe), na twardość  $HRC = 50$  [7]

nych hartowaniu izotermicznemu jest brak wyraźnego przystanku granicy plastyczności na wykresach rozciągania. Pozostaje to w ścisłym związku ze strukturą bainitu. Granica plastyczności jest tym wyraźniej ukształtowana, im bliżej stanu równowagi fazowej znajdują się węgliki oraz osnowa ferrytyczna oraz im mniej austenitu szczątkowego zawarte jest w strukturze. Struktury bainityczne natomiast odznaczają się składem chemicznym faz oddalonym najczęściej dość znacznie od składu w warunkach równowagi.

Szczególną zaletą hartowania izotermicznego jest znaczne zmniejszenie wrażliwości na działanie karbu i w ogóle podwyższenie wytrzymałości w przypadkach nierównomiernego rozkładu naprężeń. Można przypuszczać, że przyczyną jest tu zwiększona plastyczność w obszarach silnie obciążonych. W każdym razie wielokrotnie sprawdzono, że hartowanie izotermiczne zwiększa wytrzymałość postaciową części maszyn, a w szczególności części, w których występują nagle zmiany przekroju, jak ostre gwinty, rowki itp. [11].

W stali o zawartości 0,41% C, 1,63% Mn i 0,22% V przez zmniejszenie ilości szczątkowego austenitu z 9% do 1,0% otrzymano wzrost granicy sprężystości prawie o 100%. Nie zawsze jednak udaje się uzyskać całkowity rozkład austenitu, nawet przy bardzo znacznym przedłużeniu czasu wytrzymania w kąpeli. Stąd też obniżenie granicy plastyczności może być w wielu przypadkach wadą nie do usunięcia. Cechą charakterystyczną dla stali poddawa-

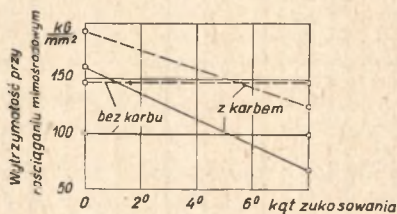
Jako przykład podać można wyniki próbmimośrodowego rozciągania (ze skośnymi podkładkami) wykonanych dla stali 30 HGSA [11] po hartowaniu izotermicznym i ulepszaniu. Próbki okrągłe, gładkie i z pierścieniowym karbem oziębiano z temperatury 880°C w oleju i odpuszczano w 500°C lub też z temperatury 880°C oziębiano w kąpieli solnej o temperaturze 350°C. Wyniki w postaci graficznej ujęto na rys. 2.

Jeżeli chodzi o wytrzymałość na zmęczenie, hartowanie izotermiczne nie daje wyraźnych korzyści w porównaniu z ulepszaniem. Obserwowano jednak pewne zwiększenie odporności materiału przy powtarzających się, stosunkowo mniej licznych, lecz znacznych obciążeniach [4].

Przy badaniach w niskich temperaturach zestawienie własności stali po hartowaniu izotermicznym i hartowaniu z odpuszczaniem pozwala dostrzec ten sam stosunek co w temperaturze otoczenia. Przy niskich twardościach najwyższą plastycznością odznaczają się struktury o sferoidalnej postaci węglików, uzyskiwane przez hartowanie i wysokie odpuszczanie, w zakresie zaś wysokich twardości przewagę zyskują struktury bainityczne.

O ile jednak w temperaturze otoczenia i w temperaturach obniżonych korzyści, osiągnięte przez zastąpienie hartowania i odpuszczania hartowaniem izotermicznym uwidaczniają się wyłącznie w zakresie wysokiej twardości czy wytrzymałości, to wydaje się, że w temperaturach podwyższonych własności bainitu są zawsze korzystniejsze od własności struktur odpuszczania czy też produktów przemiany perlitycznej. Dotyczy to przede wszystkim wytrzymałości na pełzanie [12]. Można jednak przypuszczać, że istotną przyczyną jest tu raczej niezupełność przemiany przy hartowaniu izotermicznym, a nie własności samego bainitu. Pozostałe w strukturze obszary szczytkowego austenitu przy obecności pierwiastków węglkotwórczych w stali (Cr, Mo, W) oddają bardzo powoli nagromadzony nadmiar węgla, na skutek czego stal w ciągu dłuższego czasu zachowuje zdolność wydzielania drobno oszronzonych węglików i dlatego wykazuje mniejszą skłonność do płynięcia.

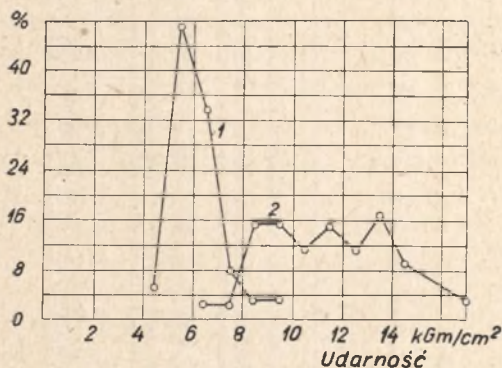
Na koniec należy podkreślić, że przy hartowaniu izotermicznym otrzymuje się znacznie większy rozrzut własności aniżeli przy zwykłym



Rys. 2. Zależność wytrzymałości, przy rozciąganiu mimośrodowym stali 30 HGSA, od kąta zukosowania podkładek. Krzywe kreskowe odnoszą się do hartowania izotermicznego z temperatury 880°C w soli o temperaturze 350°C. Linie ciągłe podają wyniki osiągnięte po hartowaniu z 880°C w oleju i dopuszczaniu w 500°C [11]

ulepszaniu. Rozrzut ten należy przypisać oddziaływaniu indywidualnych własności wytopu, związanych z metalurgicznymi i technologicznymi warunkami wytwarzania.

Na rysunku 3 podano krzywe rozrzutu udarności dla stali 30 HGSA po zwykłym hartowaniu i odpuszczaniu w 500°C oraz po hartowaniu izotermicznym w kąpeli ługowej o temperaturze 390°C. W obu przypadkach wytrzymałość na rozciąganie wahała się w granicach 120 ÷ 150 kG/mm<sup>2</sup>. Przytoczone wyniki wskazują, że w warunkach przemysłowych należy się liczyć ze znacznie zwiększonym polem rozrzutu przy hartowaniu izotermicznym, nawet jeżeli warunki obróbki cieplnej pozostają ściśle te same.



Rys. 3. Wykres częstotliwości występowania wyników próby udarności, wykonanej dla większej ilości wytopów stali 30 HGSA po hartowaniu w oleju i odpuszczaniu w 500°C (1) oraz po hartowaniu izotermicznym w 390°C [4]

### 3. Badania własne

Przedmiotem pracy było zbadanie własności wytrzymałościowych stali konstrukcyjnych ulepszanych cieplnie i hartowanych izotermicznie w celu porównania ich ciągliwości po obu tych rodzajach obróbki cieplnej. Jako podstawę dla przeprowadzenia tego porównania przyjęto udarność i przewężenie, które badano przy jednokowej twardości lub wytrzymałości na rozciąganie.

Badania przeprowadzono na czterech stalach konstrukcyjnych o tak dobranym składzie chemicznym, aby móc ustalić wpływ zmian zawartości niektórych pierwiastków stopowych. Przy zbliżonej zawartości węgla (0,34—0,42%) i chromu (0,86—1,38%) zawierały one również dodatki Mo (stal 35 HM), Mo oraz Ni (36 HMN) oraz Si (37 HS). W tablicy 1 podano skład chemiczny (na podstawie przeprowadzonych analiz) badanych stali oraz ich punkty przełomowe.

Po przeprowadzeniu prób wstępnych ustalono następujące warunki obróbki cieplnej:

a) Hartowanie w oleju przy temperaturze 850°C dla stali 40 H, 35 HM i 36 HMN, a przy temperaturze 900°C dla stali 37 HS; czas grzania w piecu elektrycznym muflowym wynosił 30 min.

b) Odpuszczanie po hartowaniu w piecu elektrycznym oporowym



Tablica 1

## Skład chemiczny badanych stali

Gatunek stali	Skład chemiczny w %								Ac <sub>1</sub> °C	Ac <sub>3</sub> °C
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo		
40 H	0,37	0,74	0,32	0,007	0,021	0,92	—	—	773	805
35 HM	0,34	0,61	0,28	0,010	0,015	0,86	0,2	0,14	740	760
36 HNM	0,42	0,77	0,35	0,011	0,012	1,19	1,37	0,16	745	775
37 HS	0,37	0,40	1,02	0,022	0,012	1,38	0,12	—	795	830

z wymuszonym obiegiem atmosfery; czas grzania wynosił 1 godzinę, po czym próbki chłodzono w oleju.

## c) Hartowanie izotermiczne

Hartowanie izotermiczne przeprowadzono stosując kolejno:

— nagrzanie do temperatury hartowania (dla stali 37 HS — 900°C, dla pozostałych 850°C) w piecu elektrycznym komorowym z atmosferą ochronną; czas grzania w każdym przypadku wynosił 30 min.;

— szybkie przeniesienie próbek do pieca elektrycznego tyglowego, do kąpeli izotermicznej o temperaturze zmienianej co 50° w zakresie od Ms do 600°C.

Czas wygrzania w kąpeli izotermicznej obliczano z krzywych CTP (rys. 4, 5, 6); dla uproszczenia przyjęto w większości przypadków czas równy 30 min. lub 1 godzinę (przy dłuższych czasach przemian); z temperatury kąpeli izotermicznej próbki chłodzono w wodzie.

Dla stali 37 HS wykresu CTP nie znaleziono, wobec czego czas przemian określono na podstawie kilku prób w różnych temperaturach, przy czym stopień zupełności przemiany kontrolowano za pomocą badań twardości i badań mikrostruktury.

Punkt Ms ustalono drogą rachunkową. Użyto tutaj kilku wzorów, z których wyników wyciągano średnią. Najbardziej zbliżone do średniej wyniki otrzymano z wzoru podanego przez Paysona i Savage'a [13].

$$M_s \text{ (}^\circ\text{C)} = 500 - 320 \cdot \% \text{ C} - 33 \cdot \% \text{ Mn} - 28 \cdot \% \text{ Cr} - 17 \cdot \% \text{ Ni} - 10 \cdot \% \text{ (Si + Mo)}.$$

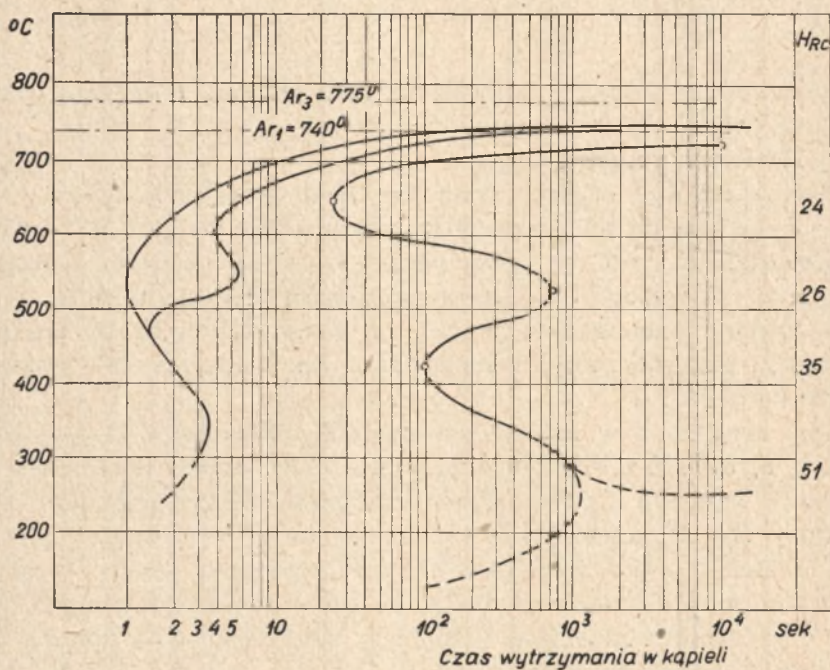
W ten sposób obliczona temperatura Ms wynosiła:

dla stali 40 H	— 330 °C
„ „ 37 HS	— 320 °C
„ „ 35 HM	— 350 °C
„ „ 36 HNM	— 280 °C

W czasie badań stwierdzono, że przy hartowaniu izotermicznym stali 40 H i 35 HM nie uzyskuje się twardości zgodnych z wykresami CTP.

Stwierdzono, że przyczyną tego było nagrzanie się warstewki soli otaczającej bezpośrednio nieruchomą próbkę. Zastosowano więc energiczne poruszanie próbek w kąpeli w pierwszym okresie po zanurzeniu, co pozwoliło na osiągnięcie właściwych twardości.

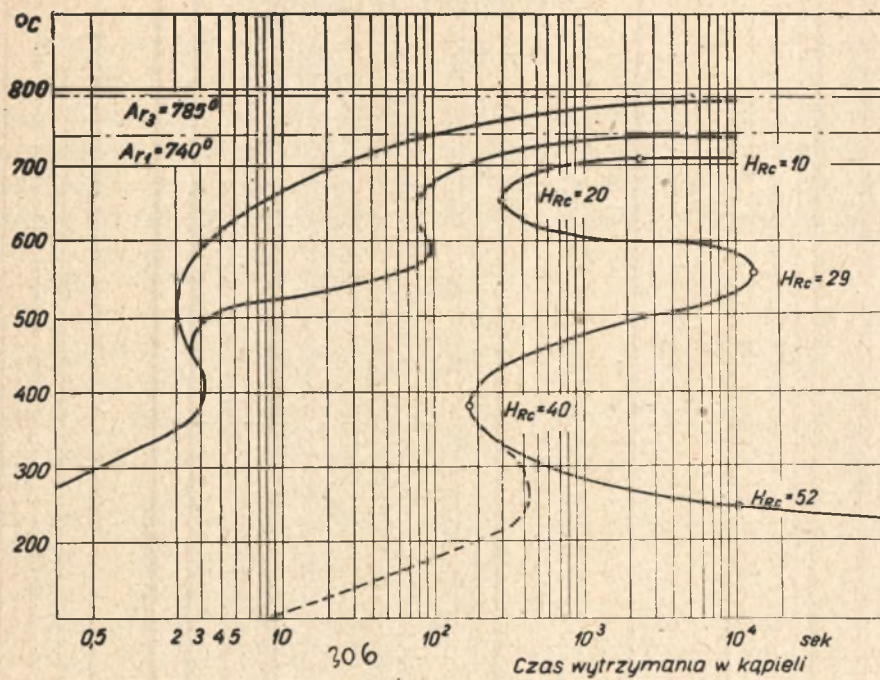
W pierwszej kolejności wykonywano hartowanie izotermiczne, a dopiero następnie ulepszanie cieplne, przy czym temperatury odpuszczania dobierano w ten sposób, aby osiągnąć zbliżoną twardość próbek ulepsza-



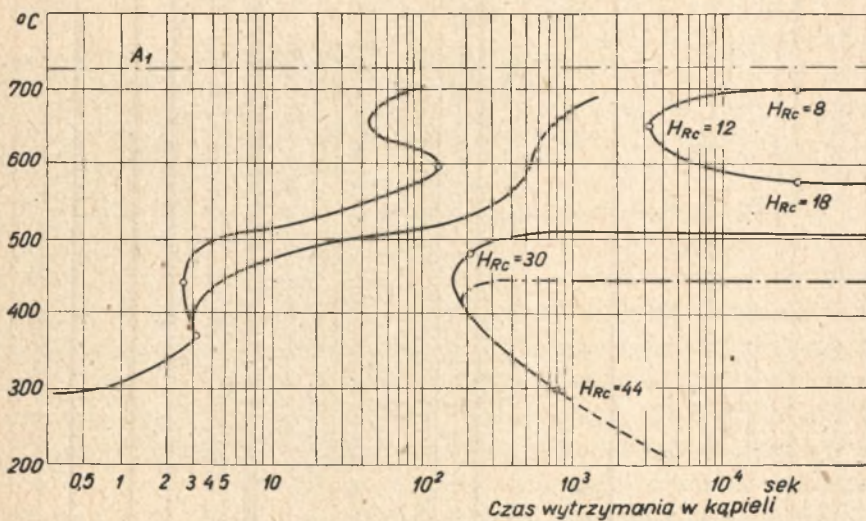
Rys. 4. Krzywa izotermicznych przemian przechłodzonego austenitu dla stali 40 H. Temperatura hartowania 850°C

nych i hartowanych izotermicznie. W ten sposób uzyskano możliwość porównywania szeregu własności wytrzymałościowych ( $R_p$ ,  $a$ ,  $c$  i  $U$ ) po hartowaniu izotermicznym i ulepszaniu cieplnym przy jednakowej wytrzymałości na rozciąganie lub twardości.

Badania przeprowadzono na próbkach udarnościowych Mesnagera ( $55 \times 10 \times 10$  mm z karbem głębokości 2 mm), na których przed obróbką cieplną pozostawiono naddatki 0,1—0,2 mm na szlifowanie. Próbki wytrzymałościowe o średnicy 8 mm posiadały na długości pomiarowej podobny naddatek na szlifowanie. Dla uzyskania średnich wyników wszystkie oznaczenia wykonywano na 3 próbkach udarnościowych i 2 próbkach wytrzymałościowych.



Rys. 5. Krzywa izotermicznych przemian przechłodzonego austenitu dla stali 35 HM. Temperatura hartowania 850°C

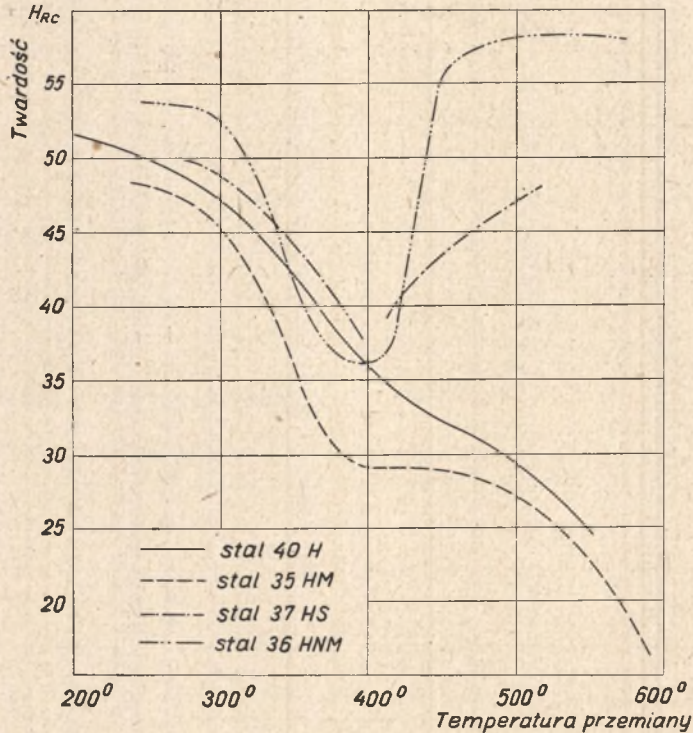


Rys. 6. Krzywa izotermicznych przemian przechłodzonego austenitu dla stali 35 HNM. Temperatura hartowania 850°C

## 4. Omówienie wyników

### 4.1. Badanie twardości i wytrzymałości

Na rysunku 7 podano twardość badanych stali po hartowaniu izotermicznym w zależności od temperatury kąpeli (czas wytrzymania w kąpeli wynosił 30 min.). W stali 40 H, ze wzrostem temperatury przemiany, początkowo łagodny spadek krzywej twardości staje się bardziej stromy



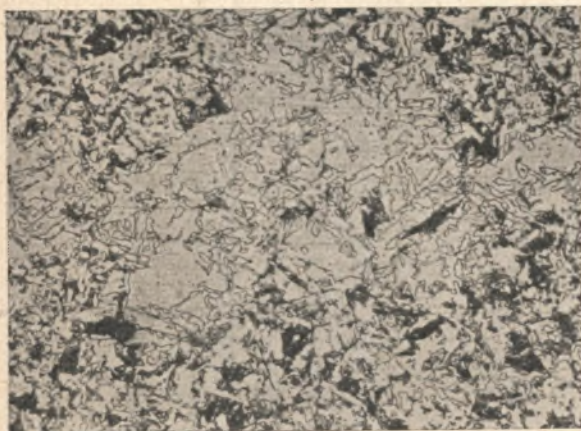
Rys. 7. Zależność twardości od temperatury przemiany przy hartowaniu izotermicznym

po przekroczeniu punktu  $M_s$ . Ciągłość spadku naruszają dopiero zjawiska zahamowania rozpadu austenitu występujące przy wyższych temperaturach przemiany. Pomiedzy 450 °C a 500 °C wystąpiło częściowe zahamowanie spadku twardości. Można sądzić, że przyczyną tego jest znaczna ilość nie rozłożonego w tej temperaturze (nawet po 60 min. wytrzymania w kąpeli) austenitu, który przy następnym chłodzeniu w wodzie zmienia się częściowo w martenzyt. Potwierdzają to badania metalograficzne. O istnieniu zakresu, w którym przemiana austenitu jest silnie hamowana, wnioskować można również z rys. 8 podającego ilość uległego rozkładowi

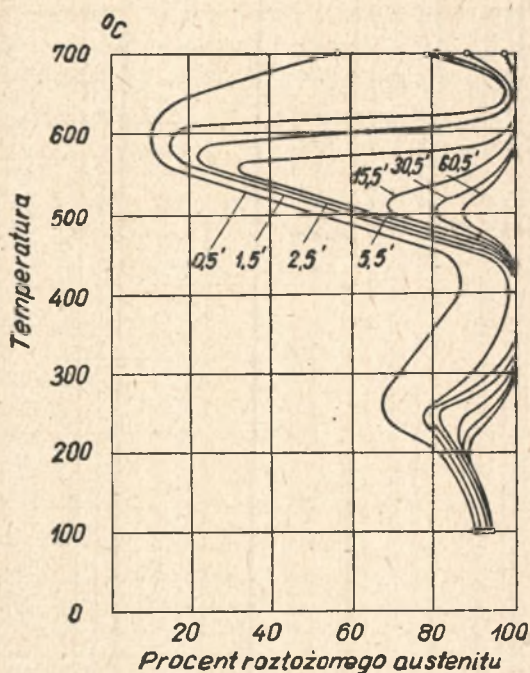
austenitu w funkcji temperatury i czasu przemiany. W omawianym zakresie po 60 min. czasu przemiany w strukturze stali pozostaje jeszcze około 12% austenitu.

Przebieg twardości dla stali 35 HM jest nieco inny, gdyż po początkowo równomiernym spadku ze wzrostem temperatury kąpeli izotermicznej w zakresie temperatur kąpeli 400 do 500° twardość pozostaje niezmienna, a następnie znów spada (patrz rys. 7).

Krzywa twardości dla stali 36 HNM wykazuje, że zakres hartowania izotermicznego tej stali jest bardzo ograniczony, co wynika również z krzywej CTP. Stal ta bowiem począwszy od temperatur kąpeli izotermicznej wyższych od 400 °C hartuje się na martenzyt (na skutek bardzo dużej trwałości przechłodzonego austenitu). Natomiast w za-



Rys. 9. Struktura otrzymana w stali 37 HS po przemianie izotermicznej w 500°C. Czas wytrzymania 1 h. Ferryt i górny bainit na tle martenzytu, Trawione kwasem azotowym.  $\times 500$

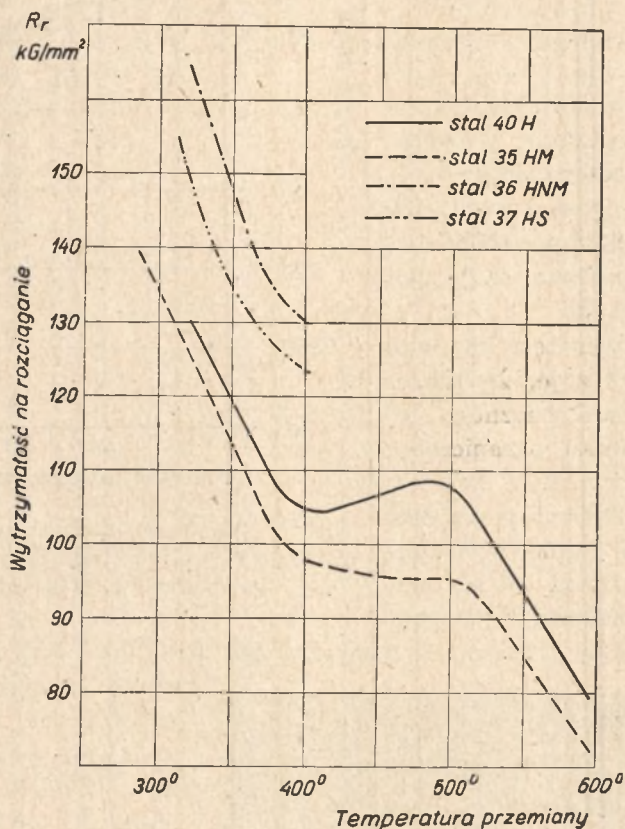


Rys. 8. Zależność ilości austenitu uległego przemianie izotermicznej w stali 40 H od temperatury i czasu przemiany

kresie temperatur kąpeli izotermicznej 400 ÷ 300 °C następuje wzrost twardości z 36 na 53  $H_{RC}$ . Dalsze obniżanie temperatury kąpeli izotermicznej (do 250 °C) nie powoduje już wzrostu twardości. Zatem najwyższa twardość po hartowaniu izotermicznym w stali 36 HNM wynosi około 53  $H_{RC}$ .

Przebieg krzywej twardości dla stali 37 HS jest podobny jak dla 36 HNM. Ze wzrostem temperatury przemiany izotermicznej

twardość spada, lecz powyżej temperatury około 400 °C procent austenitu ulegającego rozpadowi w czasie przemiany gwałtownie maleje. Pozostały austenit przy szybkim chłodzeniu przechodzi następnie w większej części w martenzyt i twardość wzrasta ze wzrostem temperatury kąpielii izotermicznej (rys. 7). Poczawszy zatem od temperatury kąpielii około



Rys. 10. Wytrzymałość w zależności od temperatury przemiany izotermicznej. Krzywe dla stali 40 H i 35 HM odnoszą się do próbek hartowanych w spokojnej kąpielii

400 °C wzwyż uzyskuje się przemianę niezupełną dającą w wyniku niejednorodną strukturę (rys. 9) i w tym zakresie hartowanie izotermiczne stali 37 HS nie jest celowe.

Przebieg krzywych wytrzymałości na rozciąganie (rys. 10) jest na ogół identyczny jak krzywych twardości i stanowi potwierdzenie poprzednich wyników. Szczegółowe wyniki badań twardości i wytrzymałości podano w tabl. 2 i 3.

Tablica 2

**Twardość uzyskana po hartowaniu izotermicznym w różnych temperaturach, przy wytrzymaniu 30 min. w kąpiel**

Temperatura przemiany °C	Twardość $H_{RC}$			
	40 H	37 HS	35 HM	36 HNM
250	50	50	—	52
300	48	48	46	49
350	42	45	36	41
400	35	37	28	36
450	32	—	28	53
500	30	—	30	58
600	17	—	17	55

Tablica 3

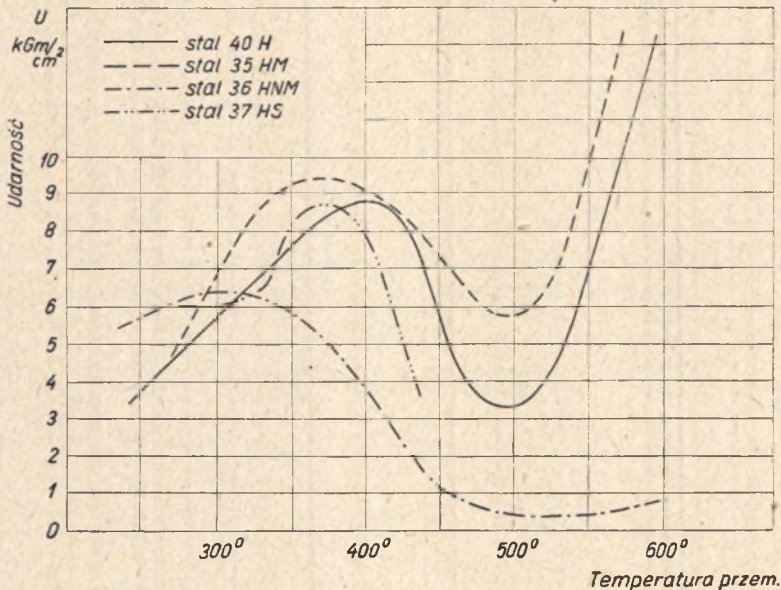
**Wytrzymałość na rozciąganie, w zależności od temperatury przemiany izotermicznej. Czas wytrzymania 30 min**

Temperatura przemiany °C	Wytrzymałość $R_r$ , kG/mm <sup>2</sup>			
	40 H	37 HS	35 HM	36 HNM
300	153 152	—	287° $\left[ \begin{array}{l} 152 \\ 145 \end{array} \right]$	—
325	—	147 152	141 138	163 162
350	122 123	134 136	109 117	149 149
400	103 105	125 127	98 98	132 129
450	105 107	— —	95 93	—
500	104 115	—	99 93	—
600	78 78	—	71 71	—

Przebieg zmian twardości i wytrzymałości w zależności od temperatury odpuszczania nie ujawnił żadnych zmian w porównaniu z wykresami podawanymi w szeregu wydawnictw informacyjnych i z tych względów nie wydaje się celowe omawiać go tutaj.

## 4.2. Badanie udarności

Wyniki badania udarności podaje tablica 4. Na rysunku 11 przedstawiono udarność próbek, hartowanych izotermicznie, w zależności od temperatury przemiany. Dla wszystkich badanych stali ze wzrostem temperatury przemiany udarność początkowo wzrasta osiągając dla większości maksimum w temperaturze  $350 \div 400^\circ\text{C}$  i następnie dość szybko opada. Można przypuszczać, że przyczyną początkowego wzrostu udarności po-



Rys. 11. Udarność w zależności od temperatury przemiany izotermicznej

winna być coraz większa ilość bainitu w strukturze, początkowo w większości złożonej z martenzytu (rys. 12). Wyjaśnienie to jednak zawodzi tutaj, ponieważ w trzech badanych stalach (40 H, 35 HM i 36 HNM) wzrost udarności występuje jeszcze przy temperaturach znacznie przewyższających punkt  $M_s$ . Prawdopodobnie wywiera tu wpływ obecność austenitu szczytkowego.

Gwałtowny spadek udarności występujący w badanych stalach powyżej  $400^\circ\text{C}$  związany jest z niepełną przemianą w tych temperaturach. I tak np. w stali 40 H po wytrzymaniu  $\frac{1}{2}$  h w  $500^\circ\text{C}$  ilość nie rozłożonego austenitu sięga 18% (rys. 8) i przy dłuższym wygrzaniu nieznacznie tylko maleje. Duża część tego austenitu przy następnym chłodzeniu zamienia się na martenzyt, w wyniku czego udarność spada (np. w stali 40 H czasami nawet do  $2,5 \text{ kGm/cm}^2$ ).



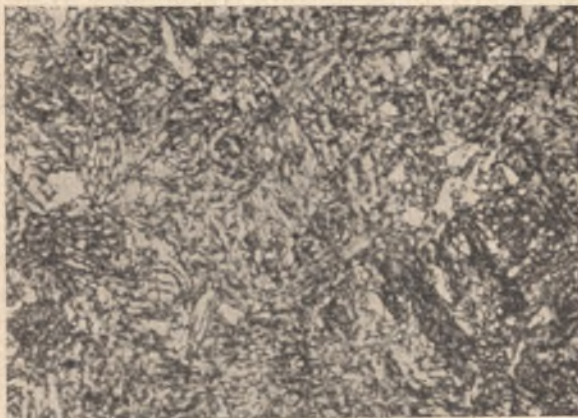
Tablica 4

**Udarność w zależności od temperatury przemiany  
izotermicznej**

Temperatura przemiany °C	Udarność $U$ kGm/cm <sup>2</sup>			
	40 H	37 HS	35 HM	36 HNM
250	4,0	6,1	—	5,1
	4,3	6,2		5,5
	3,8	5,5		5,9
275	—	—	4,8	—
			4,8	
			6,0	
300	5,1	—	—	5,1
	5,2			5,6
	5,2			5,8
325	—	7,1	7,1	6,6
		6,0	7,1	6,9
		5,8	8,7	6,6
350	6,5	8,8	9,8	5,6
	6,6	8,9	9,7	5,6
	5,6	7,2	9,5	5,6
400	9,2	7,8	9,1	3,8
	9,3	7,1	9,2	3,8
	9,1	5,6	9,2	4,9
450	5,4	—	7,4	0,7
	5,5		8,5	1,0
	5,5		8,2	0,9
500	2,3	—	4,4	0,5
	2,5		4,8	0,5
	2,2		5,7	0,5
600	13,1	—	17,3	0,8
	13,2		17,0	0,8
	13,9		16,8	0,8

Po przejściu do zakresu perlitycznego udarność ponownie wykazuje wzrost; np. w stali 40 H w temperaturze 600 °C osiąga się udarność około 13,5 kGm/cm<sup>2</sup>. Natomiast stale 36 HNM oraz 37 HS w zakresie temperatur 450 ÷ 600 °C wykazują dużą trwałość przechłodzonego austenitu, co nawet przy czasach wytrzymania w kąpeli przekraczających 2,5 h powoduje hartowanie się próbek na martenzyt i wybitnie niską udarność.

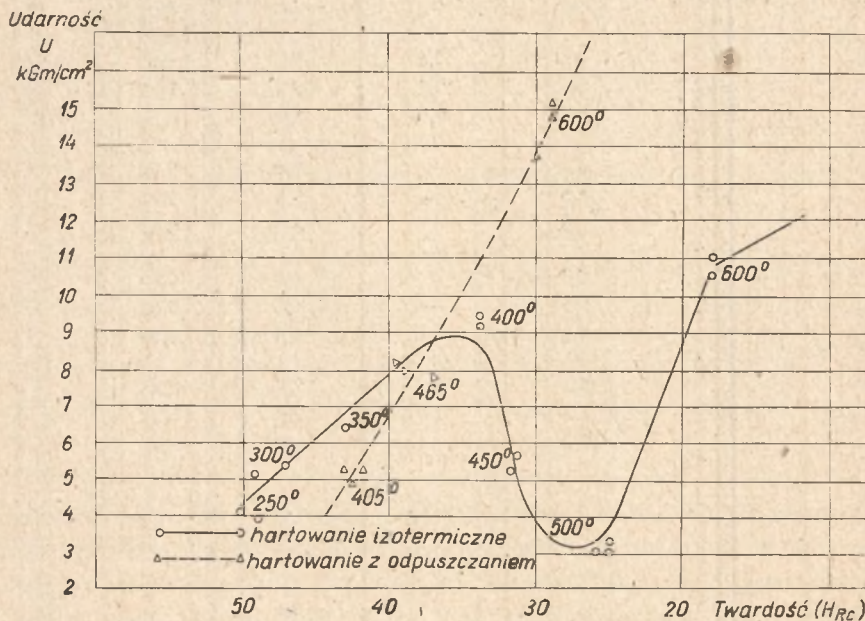
Przy próbkach hartowanych i odpuszczanych wzrostowi temperatury odpuszczania towarzyszy ciągle wzrost udarności; w stalach 40 H i 37 HS kruchość odpuszczania nie występuje dzięki zastosowaniu chłodzenia w oleju po odpuszczaniu. Dla porównania udarności stali po dwu rozpa-



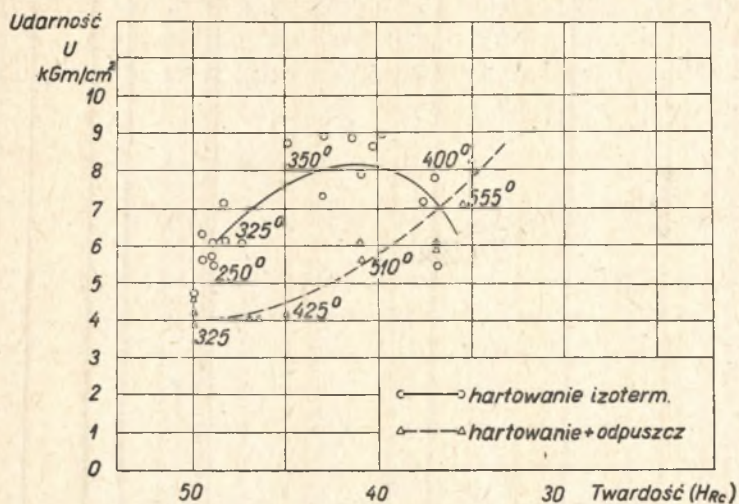
Rys. 12. Struktura otrzymana w stali 37 HS po przemianie izotermicznej w temperaturze 300°C. Obok igieł bainitu dolnego niewielkie, jasne obszary martenzytu. Trawione kwasem azotowym.  
× 1000

trywanych rodzajach obróbki cieplnej wyznaczono zależności udarności od twardości.

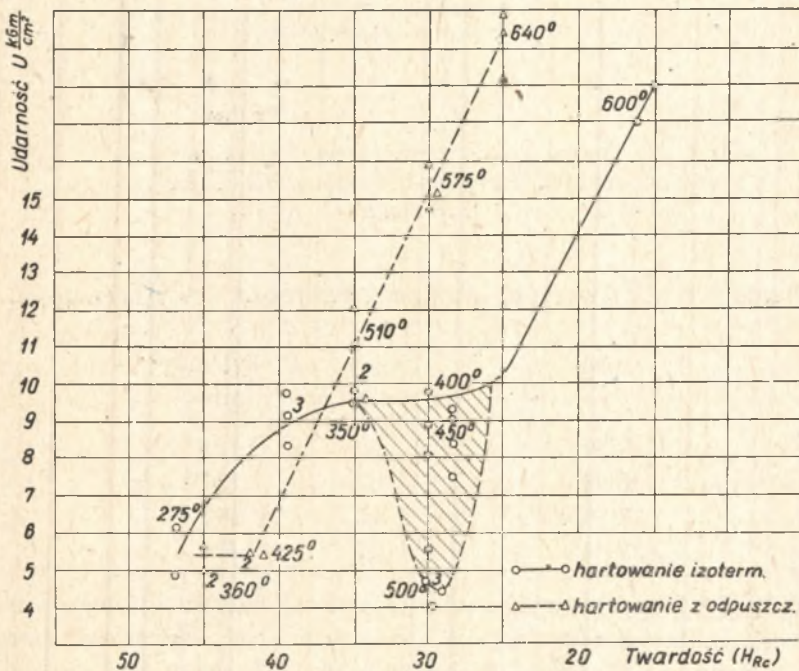
Jak wynika z wykresów na rys. 13 ÷ 16, w zakresie wyższych twardości wyższą udarność otrzymuje się po hartowaniu izotermicznym. Przy twardościach niższych, ze względu na niezupełność przemiany po obróbce izotermicznej, wyższą udarność uzyskuje się po ulepszeniu cieplnym. Tym samym, w wyniku prób uzyskano



Rys. 13. Porównanie udarności po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu i odpuszczaniu dla stali 40 H

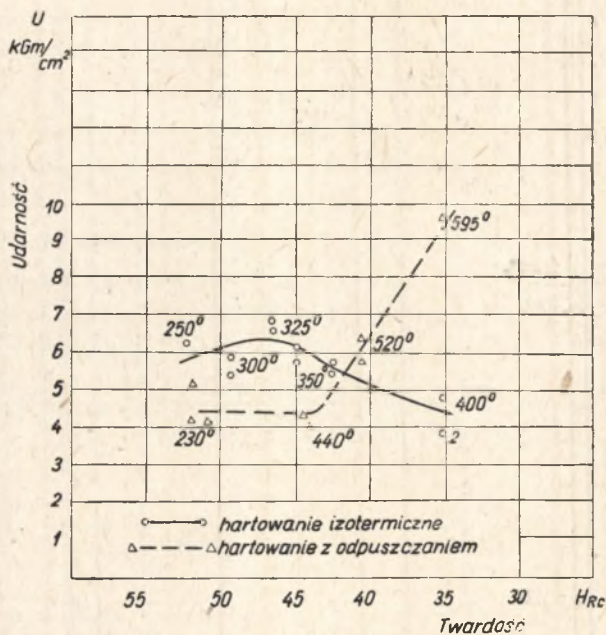


Rys. 14. Porównanie udarności po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu i odpuszczaniu dla stali 37 HS



Rys. 15. Porównanie udarności po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu i odpuszczaniu dla stali 35 HM

potwierdzenie na ogół poglądu, że stosowanie hartowania izotermicznego jest uzasadnione w przypadku, gdy twardość obrabianych przedmiotów ma być wyższa od pewnej wartości granicznej, wahającej się dla większości stali konstrukcyjnych około  $40 H_{RC}$ .



Rys. 16. Porównanie udarności po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu i odpuszczaniu dla stali 36 HNM

Dla badanych stali wartość graniczna twardości i wytrzymałości wynosi:

stal	$H_{RC}$ min.	$R_r$ kG/mm <sup>2</sup> min.
40 H	38	125
35 HM	37	121
36 HNM	42	142
37 HS	37	121

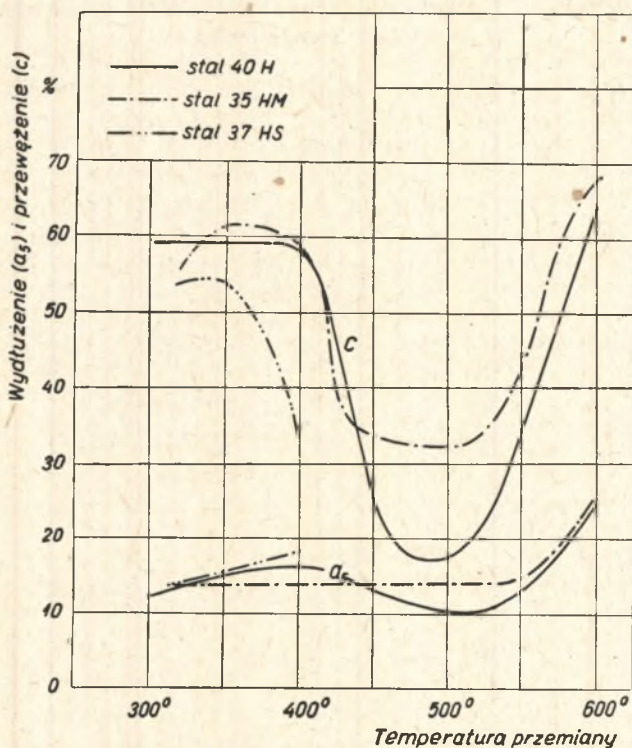
Na ogół przebieg krzywych: udarność w zależności od twardości, ma podobny charakter dla wszystkich badanych stali. Zwłaszcza podobny przebieg otrzymano dla stali 40 H i 35 HM. W stali 35 HM po ulepszeniu cieplnym występuje równomierny wzrost udarności ze spadkiem twardości, natomiast po hartowaniu izotermicznym w pewnym zakresie

twardości (25—35  $H_{RC}$ ) występuje rozrzut wyników udarności (rys. 15), zaznaczony na wykresie polem.

Rozrzut ten spowodowany jest tym, że po hartowaniu izotermicznym w kąpielach o temperaturach 400, 450, 500 °C otrzymywano podobną twardość, lecz różne udarności.

#### 4.3. Badanie własności plastycznych przy próbie rozciągania

Pomiary granicy plastyczności przeprowadzono tylko tam, gdzie była ona na tyle wyraźna, że podczas próby rozciągania występował zauważalny przystanek czy chwilowy spadek obciążenia. Nie udało się więc okre-



Rys. 17. Przewężenie i wydłużenie w zależności od temperatury przemiany izotermicznej

ślić granicy plastyczności dla większości struktur bainitycznych. Na przykład w stali 36 HNM i 37 HS ze względu na ograniczony zakres badanych wytrzymałości w żadnym wypadku nie otrzymano wyraźnej granicy plastyczności. Tam jednak, gdzie pomiary były możliwe do przeprowadzenia, można było ustalić, że najwyższym stosunkiem  $\frac{R_{pl}}{R_r}$  odznaczają się

struktury uzyskiwane po ulepszeniu. Wyniki wahają się tam w granicach  $0,9 \div 0,96$  (przy  $0,80 \div 0,89$  dla hartowania izotermicznego).

Badania zmian wydłużenia i przewężenia w zależności od temperatury przemiany (rys. 17 i tabl. 5) nie wykazały żadnych szczególnych nieprawidłowości, odzwierciedlając na ogół zmiany wytrzymałości na rozciąganie. Dla wszystkich badanych stali zmiany przewężenia są zupełnie zbliżone do przebiegu krzywych udarności.

Wydłużenie — jak widać z rys. 17 — słabiej odzwierciedla zmiany struktury.

Tablica 5

**Wydłużenie ( $a_5$ ) i przewężenie ( $c$ ) w zależności od temperatury przemiany izotermicznej**

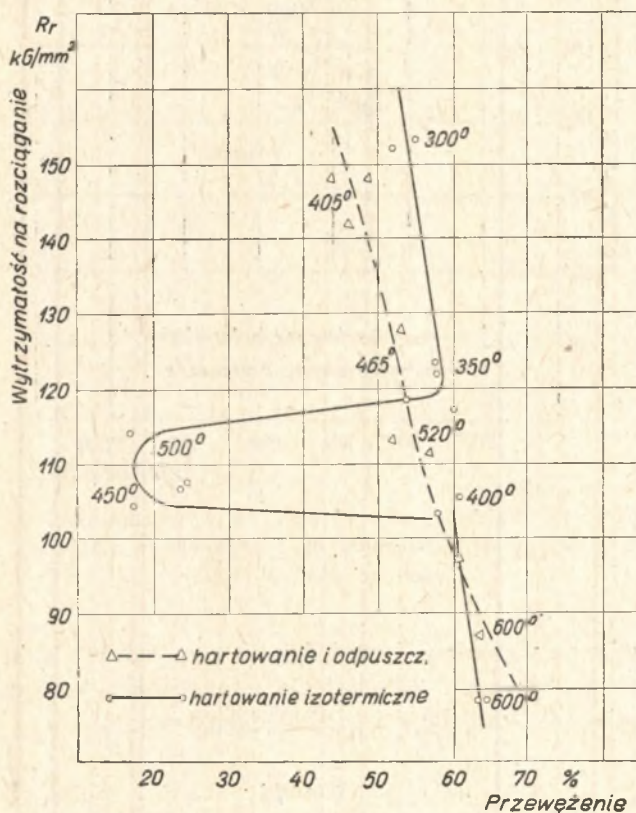
Temperatura przemiany °C	40 H		37 HS		35 HM	
	$a_5$ %	$c$ %	$a_5$ %	$c$ %	$a_5$ %	$c$ %
300	—	52 55	—	—	280° $\left[ \begin{matrix} 10 & 48 \\ 10 & 50 \end{matrix} \right]$	
325	—	—	12 13	53 53	12 13	55 54
350	—	59 60	15 14	54 54,5	12,5 17	61 —
400	16,5 15	60 58	18 17	35 35	12 14	59 60
450	13 13,5	25 24	— —	— —	14 14	31 37
500	9 11	17 17,5	— —	— —	14,5 14	27 35
550	— —	— —	— —	— —	14 13	— —
600	24 23,5	65 64	— —	— —	25 24	66 68

Na rysunkach 18—21 przedstawiono zależność między przewężeniem a wytrzymałością na rozciąganie dla próbek obrabianych izotermicznie i próbek ulepszanych. Potwierdzają one wnioski, jakie można było wyciągnąć na podstawie prób udarności. Dla każdej z badanych stali istnieje pewna graniczna wytrzymałość na rozciąganie, powyżej której hartowanie izotermiczne umożliwia uzyskanie większej ciągliwości niż harto-

wanie zwykle połączone z odpuszczaniem. Ta graniczna wytrzymałość dla poszczególnych stali wynosi:

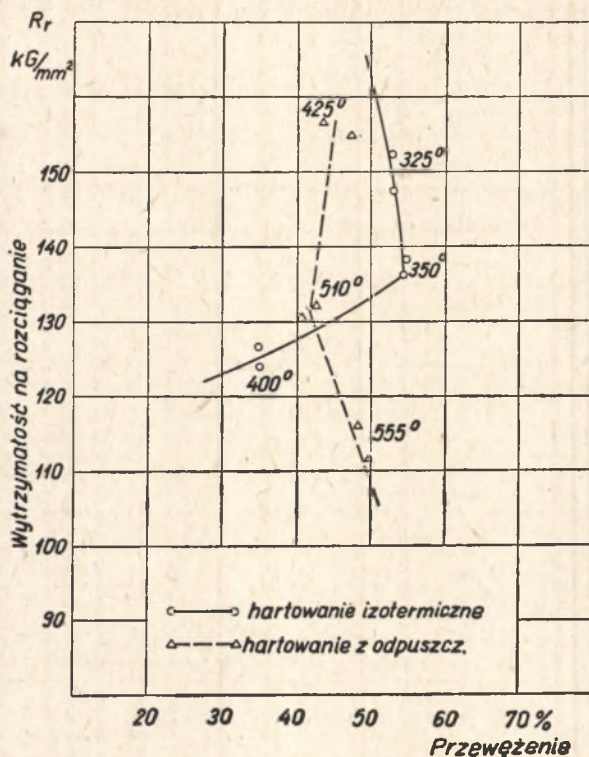
40 H	— $R_r \approx 120 \text{ kG/mm}^2$ ;	35 HM	— $R_r \approx 100 \text{ kG/mm}^2$
36 HNM	— $R_r \approx 140 \text{ kG/mm}^2$ ;	37 HS	— $R_r \approx 140 \text{ kG/mm}^2$

Być może, że wartości graniczne byłyby tu niższe, gdyby czas wytrzymania w kąpeli izotermicznej pozwolił na bardziej zupełny rozkład auste-



Rys. 18. Zależność przewężenia od wytrzymałości po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu z odpuszczaniem. Stal 40 H

nitu. Pętla bowiem, jaką tworzy krzywa dla hartowania izotermicznego na rys. 18 (stal 40 H), jest niewątpliwie spowodowana niezupełną przemianą austenitu występującą w zakresie  $450 \div 550 \text{ }^\circ\text{C}$ . W stali 36 HNM stwierdzono interesujące zjawisko jednoczesnego wzrostu wytrzymałości na rozciąganie i przewężenia (rys. 21), podobnie jak poprzednio dla tej



Rys. 19. Zależność przewężenia od wytrzymałości po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu z odpuszczaniem. Stal 37 HS

samej stali, gdy ze wzrostem twardości (w tym samym zakresie temperatur) wzrastała udarność. Do zajęcia stanowiska konieczne jest tu jednak zdobycie dalszych danych doświadczalnych.

### 5.3. Wnioski

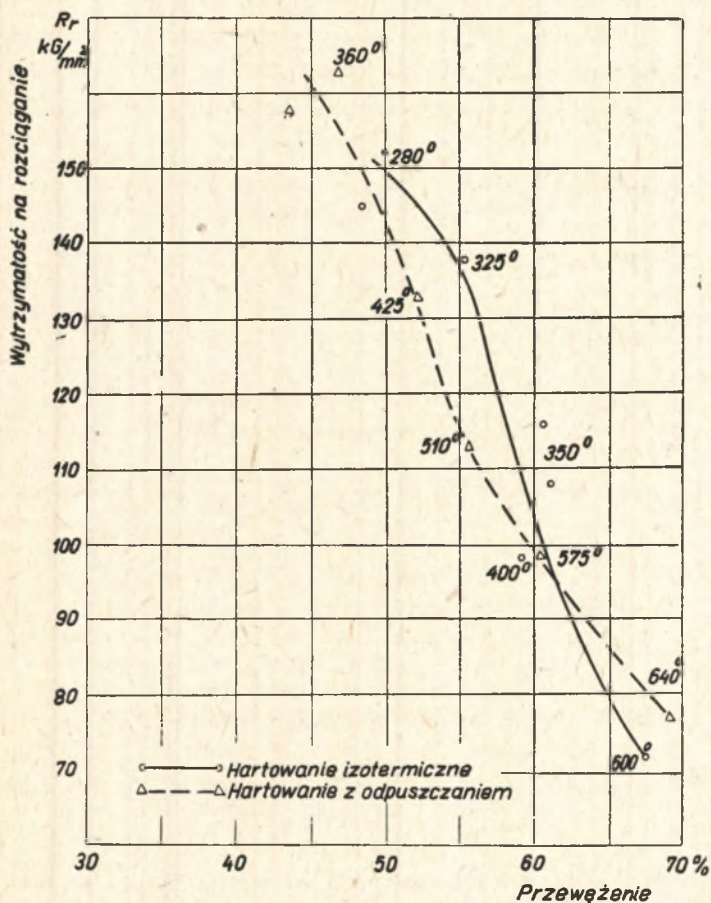
We wszystkich badanych stalach hartowanie izotermiczne umożliwia w pewnym zakresie temperatur przemiany uzyskanie wartości udarności wyższych niż po zwykłym hartowaniu z odpuszczaniem na tę samą twardość i wytrzymałość. W odniesieniu do twardości zakres, w którym hartowanie izotermiczne wykazuje przewagę udarności, rozciąga się dla stali 40 H, 37 HS i 35 HM — powyżej  $H_{RC} = 37 \div 38$ ; dla stali 36 HNM wartość graniczna jest wyższa i wynosi około  $H_{RC} = 42$ .

Absolutna wartość wzrostu udarności, osiągniętego przez zastąpienie hartowania i odpuszczania obróbką izotermiczną, nie przekracza w bada-



nych stalach  $2 \div 2,5 \text{ kG/cm}^2$ . Maksimum wzrostu przypada na twardości około  $H_{RC} = 45$ .

Przy niższych twardościach wyższą udarność uzyskuje się przy zwykłym ulepszeniu cieplnym. Analogiczne wyniki otrzymuje się przy porównaniu zależności przewężenia od wytrzymałości na rozciąganie. Zakres wytrzymałości, w którym hartowanie izotermiczne daje wyższe war-

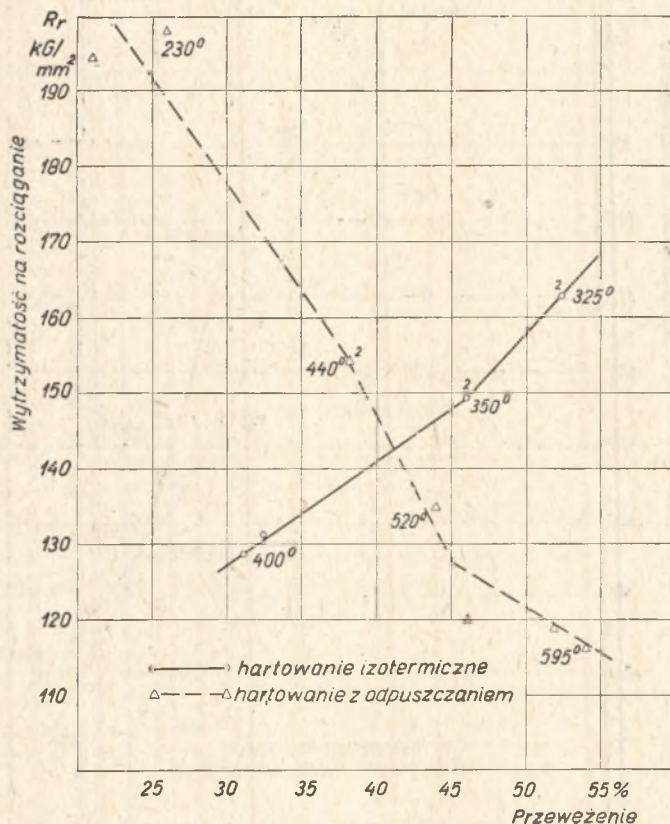


Rys. 20. Zależność przewężenia od wytrzymałości po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu z odpuszczaniem.  
Stal 35 HM

tości przewężenia, odpowiada dla stali 40 H wartościom wyższym od około  $120 \text{ kG/mm}^2$ . Dla stali 37, HS, 35 HM i 36 HNM odpowiednie wartości wynoszą 130, 100 i  $140 \text{ kG/mm}^2$ . Wzrost (absolutny) przewężenia wynosi tu, przy  $R_r \approx 135 \text{ kG/mm}^2$ , od 4% dla stali 35 HM około 12% dla stali 37 HS.

Maksymalne wyniki twardości, uzyskiwane w badanych stalach przy hartowaniu izotermicznym w zakresie bainitycznym, wynoszą, jak wynika z załączonych wykresów:  $H_{RC} = 46$  dla stali 40 H;  $H_{RC} = 48$  dla stali 37 HS;  $H_{RC} = 47$  dla 35 HM i około  $H_{RC} = 50$  dla stali 36 HNM.

W zakresie niskich twardości, w którym dla struktur bainitycznych otrzymuje się wyraźny przystanek granicy plastyczności, stosunek  $\frac{R_{pl}}{R_r}$



Rys. 21. Zależność przewężenia od wytrzymałości po hartowaniu izotermicznym oraz hartowaniu z odpuszczaniem. Stal 36 HNM

jest zawsze niższy po hartowaniu i odpuszczaniu. Niską granicę plastyczności otrzymuje się również, jeżeli próbki obrabiane izotermicznie poddać dalszemu odpuszczaniu.<sup>1</sup> Nie wydaje się więc prawdopodobne przypuszczenie, że przyczyną jest tu obecność austenitu szczątkowego w strukturze.

<sup>1</sup> Według nie publikowanych jeszcze danych.

Bardzo powolny rozpad austenitu występujący w badanych stalach w temperaturach powyżej  $400 \div 450^\circ\text{C}$  ogranicza możliwość praktycznego wykorzystania hartowania izotermicznego do prawie jednakowego dla wszystkich stali zakresu, rozciągającego się od punktu  $M_s$  do  $400^\circ\text{C}$ .

Przy hartowaniu izotermicznym stali 40 H i 35 HM uzyskanie jednorodnych struktur i właściwej twardości nie tylko w rdzeniu, ale i na powierzchni wymagało w warunkach laboratoryjnych, przy jednoczesnej obróbce kilku próbek, wprowadzenia ich w ruch w kąpieli w pierwszym okresie po zanurzeniu. Wynika stąd, że w warunkach przemysłowych konieczne jest zapewnienie intensywnego mieszania kąpieli przyspieszającego chłodzenie obrabianych przedmiotów. To samo ważne jest również i dla pozostałych stali w przypadku obróbki przedmiotów o przekrojach większych niż przekroje próbek omawianych w tej pracy.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] E. S. Davenport, E. C. Bain. Trans. ASM, t. 90, 1930, s. 117.
- [2] F. Czerwiakow, *Wybór stali dla dietalej gornych maszin i ich tjemniczeskaja obrabotka*, Ugletiechizdat, 1954.
- [3] W. Eilender, H. Arend. „Archiv. f. Eisenhüttenwesen” t. 25, 1954, Nr 1/2.
- [4] L. M. Pewzner, *Struktura i swojstwa stali pri zakałkie w goriaczyje sriedy*. Praca zbiorowa: *Mietalłowiedienije i tjemniczeskaja obrabotka*, Maszgiz, 1955.
- [5] D. K. Bullens, *Steel and its Heat Treatment*, New York-London 1948.
- [6] W. Connert, H. Kiessler, „Stahl und Eisen”, t. 68, 1948, s. 137.
- [7] E. Theis, „Stahl und Eisen”, Nr 6, 1953.
- [8] J. H. Hollomon, „Metals Technology”, t. 12, 1945, Nr 4.
- [9] J. H. Hollomon i in. Trans. ASM, t. 38, 1947, s. 807.
- [10] O. Schaaber, „Draht” (Engl. Ed.), Nr 19, 1954.
- [11] Sokołow, *Tiechnologia tjemniczeskaj obrabotki stali*, Maszgiz, 1954.
- [12] U. Wyss, „Roll” Mitteilungen, t. 7, 1948, s. 51.
- [13] A. S. M. *Metals Handbook*, Cleveland 1948.