

Marek KOWALIK¹

STRUKTURA I WŁAŚCIWOŚCI ULEPSZONEJ CIEPLNIE STALI 40HNMA PO ODKSZTAŁCENIU PLASTYCZNYM

W pracy zaprezentowano wyniki badań wpływu odkształcenia materiału w procesie walcowania wzdłużnego na właściwości mechaniczne i strukturę stali nierdzewnej 40HNMA. Metoda walcowania wzdłużnego jest jedną z nowoczesnych metod dokładnej obróbki plastycznej wałków. Polega na stopniowym kształtowaniu wałków za pomocą rolek kształtowych. Rolki posiadają część cylindryczną, której zadaniem jest przenoszenie obciążenia na tuleje podporowe oraz część roboczą, której zarys odwzorowuje kształt przekroju poprzecznego kształtowanego stopnia wałka. Przykładowo, aby ukształtować stopnie wałka o przekroju kołowym, należy użyć rolki, których część robocza składa się z powierzchni toroidalnej oraz dwóch powierzchni stożkowych. Wymiary i powierzchnie przekroju poprzecznego odkształconego wałka odnoszą się do odpowiednich wymiarów i powierzchni przekroju poprzecznego wałka nieodkształconego. Proces walcowania wzdłużnego powoduje jednorodną zmianę w strukturze materiału w całym przekroju poprzecznym kształtowanego wałka, niezależnie od metody użytej do jego odkształcania. Po tej obróbce stal wykazuje strukturę sorbityczną z ziarnami w formie igieł, które są zorientowane w różnych kierunkach. W wałkach walcowanych metodami ciągnięcia i pchania, których odkształcenie względne przekracza wartość $\varepsilon_i = 4,29$, ziarna były widocznie zgniecione i wydłużone oraz przyjmowały orientację równoległą do kierunku odkształcenia.

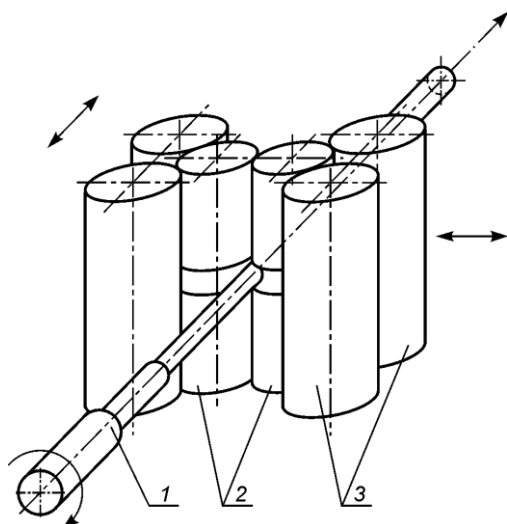
Słowa kluczowe: obróbka cieplno-mechaniczna, walcowanie wzdłużne na zimno, właściwości wytrzymałościowe

1. Charakterystyka procesu walcowania wzdłużnego na zimno wałków stopniowanych

Metoda walcowania wzdłużnego jest jedną z nowoczesnych metod dokładnej obróbki plastycznej wałków na zimno [1]. Polega ona na kształtowaniu stopnia wałka odpowiednio dobranymi rolkami. Rolki mają część walcową, której zadaniem jest przenoszenie obciążeń na rolki podporowe i część roboczą o zarysie odpowiadającym przekrojowi poprzecznemu kształtowanego stopnia wałka.

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Marek Kowalik, Uniwersytet Techniczno-Humanistyczny, ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom, tel.: 48 3617614, e-mail: m.kowalik@uthrad.pl

Do kształtowania stopnia wałków o przekroju kołowym stosuje się rolki, których część robocza składa się z powierzchni torusa i dwóch powierzchni stożkowych. Schemat kształtowania wałków stopniowanych metodą walcowania wzdłużnego przedstawiono na rys. 1. Wałek (1), zamocowany w sposób umożliwiający jego wydłużanie się w procesie kształtowania, jest umieszczony pomiędzy dwoma rolkami kształtującymi (2), z których każda jest podparta dwoma rolkami oporowymi (3). Rolki kształtujące (2) mają część walcową, której zadaniem jest przeniesienie obciążeń na rolki oporowe (3). Rolki oporowe (3) mogą obracać się wokół swej osi, umożliwiając w ten sposób obrót rolek kształtujących (2) w trakcie procesu walcowania. Plastyczne formowanie wałka polega na kilku lub kilkunastu przejściach obróbkowych. Do niewątpliwych zalet metody walcowania wzdłużnego wałków należy zaliczyć: duże możliwości kształtowania stopni o zmiennych wymiarach i zarysach przekrojów poprzecznych w jednej operacji obróbkowej, możliwość obróbki wałków z materiałów o dobrych właściwościach wytrzymałościowych, bardzo dużą trwałość narzędzi wynikającą z charakteru ich pracy oraz łatwość automatyzacji procesu kształtowania.



Rys. 1. Schemat kształtowania wałków metodą walcowania wzdłużnego

Fig. 1. Scheme of the longitudinal cold rolling of the shafts

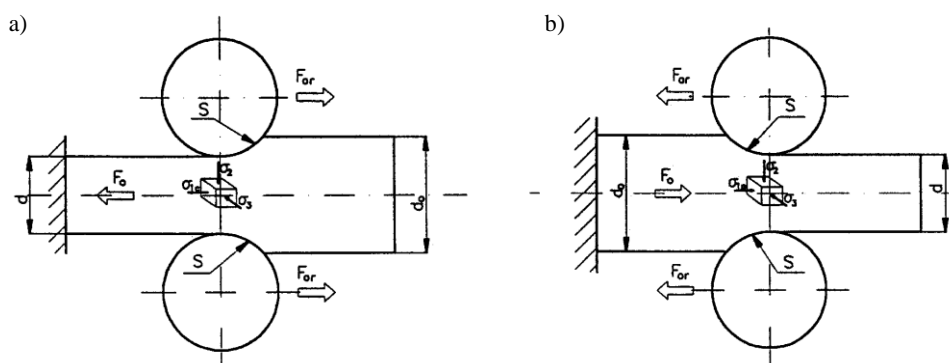
2. Wpływ odkształcenia podczas kształtowania na właściwości wytrzymałościowe

Ze względu na układ sił działających na wałek w procesie kształtowania można wyróżnić dwie odmiany walcowania wzdłużnego:

- w układzie ciągnącym z udziałem siły rozciągającej (rys. 2a)
- w układzie pchającym z udziałem siły ściskającej (rys. 2b).

W obu przypadkach występują podobne fazy przebiegu cyklu walcowania, lecz odmienny stan naprężeń w kształtowanym wałku. W układzie ciągnącym występuje osiowa siła rozciągająca, ukształtowany stopień wałka, dlatego ta

odmiana procesu jest predysponowana do smukłych wałków o małych średnicach. Materiał w czasie kształtowania jest poddany w strefie odkształcenia dwuosiowemu ścisnaniu z jednoosiowym rozciąganiem. Wałki kształtowane w układzie pchającym dają się łatwo mocować, jednak średnica nie może być zbyt mała ze względu na niebezpieczeństwo wyboczenia od siły ścisnącej osiowo wałek podczas obróbki. W strefie odkształcenia występuje trójosiowe ściskanie [2-4].



Rys. 2. Modele obciążenia wałka i stanu naprężeń w procesie walcowania wzdłużnego: a) w układzie ciągnącym, b) w układzie pchającym

Fig. 2. Models of loading of the shaft and stress state in the longitudinal rolling process: a) drawing system, b) pushing system

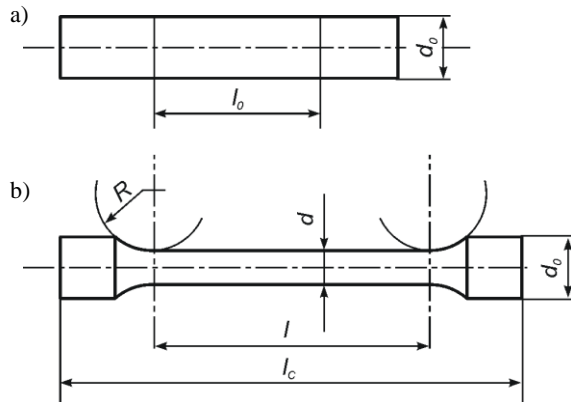
W określaniu odkształceń posłużono się zmianami wymiarów liniowych i pól odpowiednich przekrojów, rozpatrując wymiary liniowe i pole przekroju wałka po odkształceniu odniesione do analogicznych wielkości przed odkształceniem. Otrzymano odkształcenie względne ε_l , które jest ogólnie uznana miarą odkształcenia (rys. 3.):

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (1)$$

lub po przekształceniu i wprowadzeniu warunku stałej objętości:

$$\varepsilon_l = \frac{d_0^2 - d^2}{d^2} \quad (2)$$

gdzie: l_0 – długość wyjściowa do walcowania,
 l – długość walcowania,
 d_0 – wyjściowa do walcowania,
 d – średnica po walcowaniu.



Rys. 3. Wałek przed kształtowaniem (a) oraz po walcowaniu (b): l_0 – długość wyjściowa, d_0 – średnica wyjściowa, R – promień roboczy rolki, d – średnica kształtowana, l – długość po kształtowaniu

Fig. 3. Shaft before (a) and after (b) forming: l_0 – initial length, d_0 – initial diameter, R – working radius of the roll, d – formed diameter, l – length after forming

Badania zostały przeprowadzone na wałkach wykonanych ze stali stopowej chromowo-niklowo-molibdenowej 40HNMA według normy PN-89/H-84030, ulepszonej cieplnie przed kształtowaniem do twardości 34HRC. Jest to stal o różnym zastosowaniu w budowie odpowiedzialnych części maszyn, szczególnie na wałki, posiadająca swoje odpowiedniki w wielu krajach (4340H według ASTM, G4103 według JIS, 40ChN2MA według GOST). Do badania wyselekcjonowano próbki ulepszone cieplnie do twardości 34HRC i przygotowano według schematu przedstawionego na rys. 3. Próbki w środkowej ich części o średnicach początkowych 11, 15, 19, 21 i 23 mm walcowano wzdłużnie metodą ciągnięcia, odkształcając je do średnicy 10 mm. Zastosowano następujące średnice przejściowe 19, 16, 12 i 10 mm, co oznacza, że wałek o średnicy wyjściowej 23 mm był odkształcany na średnicę 19, 16 oraz 12 mm, a ostatecznie na średnicę 10 mm. Otrzymano próbki z następującymi odkształceniami ε_t wynoszącymi 0,21; 1,25; 2,61; 3,41; 4,29. Długości walcowanej części dobrano tak, aby otrzymać wałki (próbki) o średnicy 10 mm i jednakowej długości oraz konstrukcji odpowiadającej wymaganiom badań wytrzymałości w próbie jednoosiowego statycznego rozciągania. W tabeli 1. umieszczono wyniki pomiarów średnic i długości przed oraz po walcowaniu. Następnie otrzymane metodą walcowania wzdłużnego na zimno wałki badano w statycznej próbie rozciągania na maszynie wytrzymałościowej ZD40 według zaleceń normy ISO 6892-1. Na rysunku 4. przedstawiono wykresy z próby jednoosiowego rozciągania, umieszczając je na jednym układzie współrzędnych. Można zaobserwować, że mimo dość wysokiej twardości 34HRC materiał podlegał znacznemu wydłużeniu.

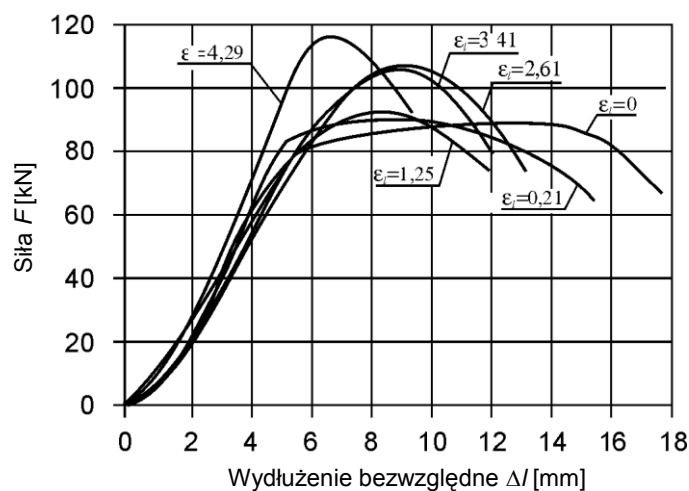
Badania wykazały monotoniczny wzrost wartości umownej granicy plastyczności wraz z rosnącym odkształceniem względnym (rys. 5.) z wyraźną tendencją spadkową po przekroczeniu odkształcenia $\varepsilon_t = 2,61$. Wartość wytrzymałości na rozciąganie R_m zwiększała się wraz ze wzrostem odkształcenia w wyniku walcowania. Maksymalny przyrost R_m (wynoszący 30%) w stosunku do materiału nieodkształconego ($\varepsilon_t = 0$) wystąpił dla odkształcenia $\varepsilon_t = 4,29$.

Intensywny przyrost wytrzymałości na rozciąganie R_m obserwuje się zaś dla odkształceń w przedziale $\varepsilon_l = 1,25 \div 4,29$. Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ w wyniku walcowania zwiększa się najbardziej w przedziale $\varepsilon_l = 0 \div 2,61$.

Tabela 1. Wymiary próbek otrzymanych technologią walcowania wzdłużnego na zimno, metodą ciągnięcia

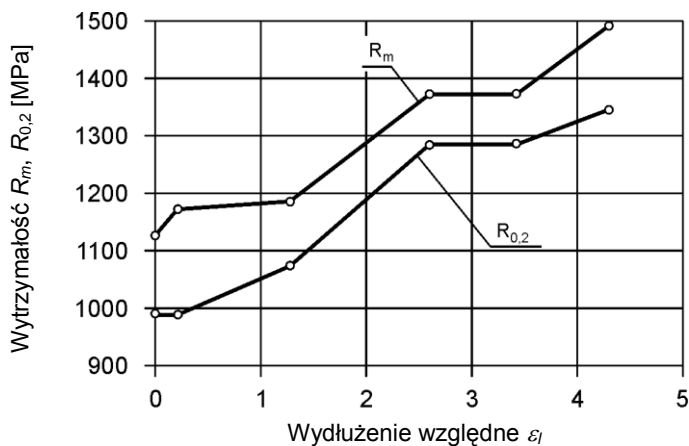
Table 1. Dimensions of the samples obtained by drawing method of longitudinal cold rolling technology

Lp.	Średnice		Długość wyjściowa walcowania l_0 [mm]	Długość walcowania końcowa l [mm]	Średnice przejściowe d_i [mm]	Wydłużenie względne stopnia ε_l
	wyjściowa d_0 [mm]	końcowa d [mm]				
1	–	10,00÷10,02	–	105	–	0
2	11 _{-0,02}	10,02÷10,05	85	105	10	0,21
3	15 _{-0,02}	10,02÷10,05	50	105÷108	12	1,25
4	19 _{-0,02}	10,03÷10,06	31	105÷108	16;12;10	2,61
5	21 _{-0,02}	10,03÷10,06	25	105÷110	19;16;12;10	3,41
6	23 _{-0,02}	10,03÷10,08	21	105÷110	19;16;12;10	4,29



Rys. 4. Wykresy rozciągania próbek wykonanych metodą ciągnięcia z odkształceniami $\varepsilon_l = 0 \div 4,29$

Fig. 4. The graphs of sample tensile made by drawing method with strain $\varepsilon_l = 0 \div 4,29$



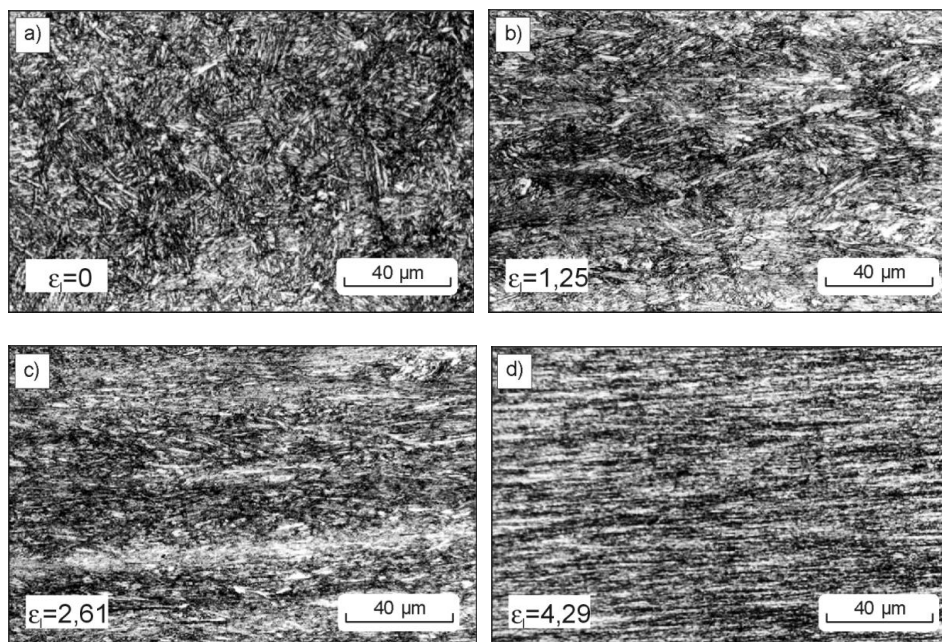
Rys. 5. Zależność umownej granicy plastyczności $R_{0,2}$ i wytrzymałości na rozciąganie R_m od odkształcenia względnego wałka ϵ_l

Fig. 5. Dependence of conventional yield point $R_{0,2}$ and the tensile strength R_m on the shaft's relative strain ϵ_l

3. Wpływ odkształcenia na strukturę materiału w procesie walcowania wzdłużnego

Proces walcowania wzdłużnego powoduje jednakowe zmiany struktury w całym przekroju kształtowanego wałka [5]. Stal stopowa 40HNMA ulepszona cieplnie przed kształtowaniem do twardości 34HRC ma strukturę sorbityczną z ziarnami w postaci igłowej (rys. 6a). Ziarna są zorientowane w różnych kierunkach. W wyniku odkształcenia materiał zaczyna się wydłużać, a ziarna orientują się zgodnie z kierunkiem walcowania [6], równoległe do osi wałka. Przy wartości odkształcenia $\epsilon_l = 1,25$ jest widoczne pewne ukierunkowanie ziaren (rys. 6b), dla zaś zwiększających się odkształceń powyżej $\epsilon_l = 2,61$ (rys. 6c, d) ziarna są wyraźnie zorientowane wzdłuż kierunku walcowania, tworząc charakterystyczną teksturę zgniotu.

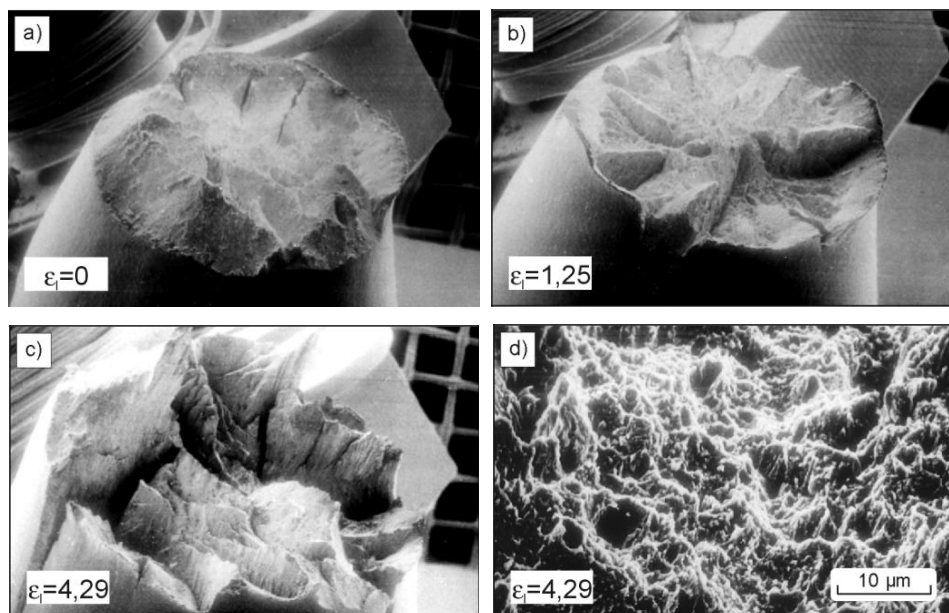
Badania fraktograficzne przełomów przeprowadzono na mikroskopie skaningowym JEOL JSM-35. Obserwowano zmiany w wyglądzie powierzchni przełomu dokonanego w próbie jednoosiowego rozciągania na wałkach wykonanych z różnym odkształceniem ϵ_l . Przełomy wałków odkształconych w zakresie $\epsilon_l = 0 \div 4,29$ (rys. 7a-c) zmieniały się wraz ze wzrostem odkształcenia. Znikała stożkowa otoczka i zwiększał się udział nachylonych po kątem 45° makroskopowo gładkich powierzchni ścinania. Uwidaczniały się promieniowe szczeliny



Rys. 6. Struktura wałków wykonanych z różnym odkształceniem ε_l , zglądy pobrane równoległe do kierunku odkształcenia: a) odkształcenie $\varepsilon_l = 0$, b) odkształcenie $\varepsilon_l = 1,25$, c) odkształcenie $\varepsilon_l = 2,61$, d) odkształcenie $\varepsilon_l = 4,29$

Fig. 6. Structures of the shafts prepared with different levels of strains ε_l , metallographic specimens are made parallel to the direction of deformation: a) strain $\varepsilon_l = 0$, b) strain $\varepsilon_l = 1,25$, c) strain $\varepsilon_l = 2,61$, d) strain $\varepsilon_l = 4,29$

i zwiększała się nieregularność powierzchni. Badania mikroskopowe wykazały plastyczny charakter rozdzielania (rys. 7d) dla wszystkich odkształceń z zakresu $\varepsilon_l = 0 \div 4,29$. Wraz ze wzrostem odkształcenia wyraźnie bogatsza staje się rzeźba powierzchni przełomu, ponieważ wzrastają wysokości uskoków i głębokości zagłębień. Płaszczyzny pęknięć są strome, co świadczy o dużym stopniu tekstury materiału. Wzrastająca nierównomierność powierzchni przełomu świadczy o złożonym charakterze pęknięć po różnych płaszczyznach z uskokami i wyciągnięciami. Wraz ze wzrostem odkształcenia ε_l rośnie liczba pęknięć odłomowych i ich głębokość po kierunku zgodnym z kierunkiem ułożenia włókien po obróbce plastycznej [7].

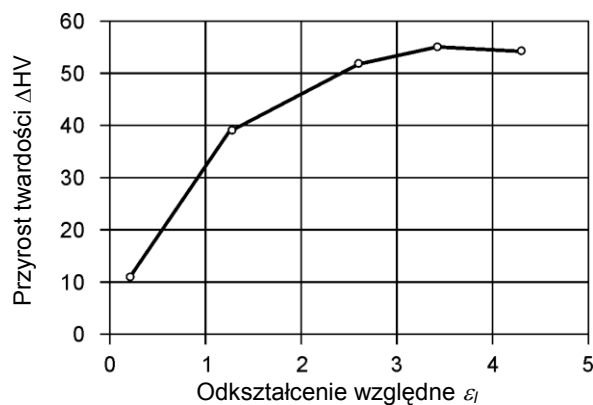


Rys. 7. Przelomy otrzymane w próbie jednoosiowego rozciągania wałków wykonanych z różnym odkształceniem ε_l : a) $\varepsilon_l = 0$ (pow. 12 \times), b) $\varepsilon_l = 1,25$ (pow. 12 \times), c) $\varepsilon_l = 2,61$ (pow. 12 \times), d) $\varepsilon_l = 4,29$

Fig. 7. Fracture surfaces obtained under the conditions of uniaxial tension of the shafts deformed to different levels of strains ε_l : a) $\varepsilon_l = 0$ (mag. 12 \times), b) $\varepsilon_l = 1,25$ (mag. 12 \times), c) $\varepsilon_l = 2,61$ (mag. 12 \times), d) $\varepsilon_l = 4,29$

4. Badania twardości wałków wykonanych metodą ciągnięcia

Badania twardości przeprowadzono metodą Vickersa zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 6507-1, dokonując pomiarów twardości wałków przed i po walcowaniu. Pomiarzy mikroztwardości przeprowadzono na zglądach pobranych



Rys. 8. Zmiany przyrostu twardości ΔHV w funkcji odkształcenia względnego ε_l

Fig. 8. Variations of the increment of hardness ΔHV as the function of relative strain ε_l

poprzecznie i wzdłużnie do kierunku odkształcenia. Mikrotwardość w przekroju wzdłużnym była minimalnie większa w wyniku rosnącej z wielkością odkształcenia anizotropii. Badania mikrotwardości wykazały jej jednolitą wartość na całej powierzchni przekroju dla danego odkształcenia. Pomiarów dokonano, przesuując się po powierzchni z zewnątrz do osi próbki z krokiem 0,1 mm. Średnia mikrotwardość przy obciążeniu 0,98 N wyniosła 390 HV_{0,1}, a rozrzut był w granicach ±20 HV_{0,1}. Badania twardości wałków po walcowaniu przedstawiono na wykresie (rys. 8.), podając przyrost twardości ΔHV w funkcji odkształcenia względnego ε_i .

5. Podsumowanie

Proces walcowania wzdłużnego na zimno wyraźnie zwiększa właściwości wytrzymałościowe wałków wykonanych ze stali stopowej 40HNMA ulepszonej cieplnie przed kształtowaniem. Wytrzymałość na rozciąganie R_m i umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ zwiększają się wraz ze stopniem odkształcenia. Maksymalny przyrost wytrzymałości wynoszący o ok. 30% występuje dla $\varepsilon_i = 4,29$. Przy wartości odkształcenia $\varepsilon_i = 4,29$ nie zaobserwowano pęknięć na powierzchni ani na zglądach pobranych poprzecznie i wzdłużnie do kierunku walcowania. W badaniach metalograficznych obserwowano rozwój tekstury materiału wraz ze wzrostem odkształcenia. Igłowe ziarna sorbitu pierwotnie zorientowane w różnych kierunkach w wyniku odkształcenia wydłużały się i orientowały równoległe do osi wałka. W badaniach fraktograficznych zaobserwowano wraz ze zwiększającym się odkształceniem wzrost liczby pęknięć odłamowych. Przyrost twardości materiału w procesie walcowania wzdłużnego jest niewielki i wynosi ok. 12% dla odkształcenia $\varepsilon_i = 4,29$. Stosowanie walcowania wzdłużnego w celu podniesienia właściwości wytrzymałościowych jest najbardziej efektywne dla odkształceń do $\varepsilon_i = 2,61$, ponieważ powyżej tej wartości wytrzymałość na rozciąganie R_m i umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ wzrastają nieznacznie.

Literatura

- [1] Jeziński J. i in.: Kształtowanie wałków stopniowanych metodą walcowania wzdłużnego. *Mechanik* nr 11, 1983, 23-28.
- [2] Kowalik M.: Application of longitudinal cold rolling method in mass production of stepped shafts used in combustion engines. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. X, 4, 2010, 45-56.
- [3] Kowalik M., Trzepieciński T.: Experimental and numerical study on determination of forces during cold rolling of shafts, *Journal of Iron and Steel Research, International*, 20(10), 2013, 57-63

- [4] Trzepieciński T., Kowalik M.: Modelowanie numeryczne procesu walcowania wzdłużnego wałków o przekroju kołowym, Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej 226, Mechanika, (2009), 189-194.
- [5] Kowalik M.: Influence of deformation on the structure and properties of materials in longitudinal cold rolling of multidiameter shafts. Materials Science, 46, 2011, 679-684.
- [6] Agas'yants G.A., Semibratov G., Kodjaspirov G.E.: Experience in TMT with the use of cold lengthwise rolling in seed rolls, Metal Sci. Heat Treat., 49(1-2), 29 (2007).
- [7] Bernsztejn L.M.: Struktura i własności mechaniczne metali, WNT, Warszawa 1973.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF QUENCHED AND TEMPERED 40HNMA STEEL AFTER PLASTIC FORMING

Summary

The results of the effect of material deformation in the longitudinal cold rolling process on mechanical properties and structure of the stainless steel 40HNMA are presented. The method of longitudinal rolling is one of the modern methods of precise cold plastic working of shafts. It consists in forming the shaft's steps by means of appropriately shaped rolls. The rolls have a cylindrical part, whose task is to transmit the load onto support sleeves, and the working part whose contour reflects the shape of transverse cross-section of the formed shaft step. For example, to form shaft steps of circular cross-section, one uses the rolls whose working part consists of a toroidal surface and two conical surfaces. The dimensions and cross-section areas of the strained shaft are related to those existing in the shaft without strain. The process of longitudinal rolling causes uniform changes of material structure in the whole cross-section of the formed shaft, irrespective of method used to produce the strain. After this treatment, the steel had a sorbitic structure with grains in the form of needles, which were oriented in different directions. In the shafts rolled by pulling and pushing methods, in which the relative strain reached the value of $\varepsilon_i = 4.29$, the grains were evidently compressed and elongated, and took orientation parallel to the direction of strain.

Keywords: thermomechanical treatment, longitudinal cold rolling, mechanical properties

DOI:10.7862/rm.2013.15

Otrzymano/received: 15.05.2013

Zaakceptowano/accepted: 25.07.2013