



PRACE INSTYTUTU METALURGII ŻELAZA

TRANSACTIONS OF THE INSTYTUT METALURGII ŻELAZA

MONOGRAFIE

Dariusz Woźniak

WPŁYW STANÓW MECHANICZNYCH W KOTLINIE WALCOWNICZEJ NA ZAMYKANIE I ZGRZEWANIE NIECIĄGŁOŚCI WE WLEWKACH Z COS



Monografie

Dariusz Woźniak

**WPŁYW STANÓW MECHANICZNYCH
W KOTLINIE WALCOWNICZEJ
NA ZAMYKANIE I ZGRZEWANIE NIECIĄGŁOŚCI
WE WLEWKACH Z COS**

Gliwice 2013

RECENZENCI

Prof. dr hab. inż. Franciszek GROSMAN

Prof. dr hab. inż. Stanisław TURCZYN

KOMITET NAUKOWY SERII MONOGRAFIE

Prof. dr hab. inż. Leszek BLACHA

Prof. dr hab. inż. Włodzimierz DERDA

Prof. dr hab. inż. Henryk DYJA, Dr h.c.

Prof. dr hab. Roman KUZIĄK

Prof. dr hab. inż. Andrzej ŁĘDZKI

Prof. dr hab. inż. Kazimierz MAMRO

Prof. dr hab. Józef PADUCH

ISBN: 978-83-916893-1-8

Wydawca: Instytut Metalurgii Żelaza, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice

ZESPÓŁ REDAKCYJNY

redaktor naczelny – prof. dr Tadeusz BOŁD

zastępca redaktora naczelnego – prof. dr hab. Józef PADUCH

redaktorzy tematyczni – prof. dr hab. Roman KUZIĄK, dr Grażyna STANKIEWICZ,

dr hab. inż. Marian NIESLER, prof. nzw., dr hab. Jerzy WIEDERMANN, prof. nzw.

redaktorzy techniczni – mgr inż. Ewa PACZOSKA, dr inż. Joanna FURMANEK

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	6
1. WPROWADZENIE	8
2. STUDIUM LITERATUROWE	12
2.1. WADY WLEWKÓW Z COS	12
2.2. KALIBROWANIE STOSOWANE W WALCOWNIACH BRUZDOWYCH DO WALCOWANIA PRĘTÓW I WALCÓWKI .	18
2.2.1. Wykroje	18
2.2.2. Układy wydłużające	19
2.3. KALIBROWANIE WALCÓW W NOWOCZESNYCH WALCOWNIACH ŚREDNICH I MAŁYCH.....	29
2.4. NOWE URZĄDZENIA I TECHNOLOGIE WALCOWANIA UMOŻLIWIAJĄCE INTENSYFIKACJĘ ODKSZTAŁCANIA PASMA.....	30
2.4.1. Walcarki intensywnej redukcji	30
2.4.2. System walcowania ADF	33
2.5. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PŁYNIĘCIE MATERIAŁU ORAZ ZAMYKANIE I ZGRZEWANIE NIECIĄGŁOŚCI	36
2.5.1. Parametry wpływające na sposób płynięcia materiału w procesie walcowania	36
2.5.2. Kryteria zamykania i zgrzewania wewnętrznych nieciągłości materiału w procesie walcowania na gorąco..	38
2.5.3. Wpływ współczynnika kształtu strefy odkształcenia na zamykanie i zgrzewanie nieciągłości wewnętrznych ..	41
2.6. PODSUMOWANIE PRZEGLĄDU LITERATURY	44
3. CEL I TEZA PRACY	47
4. NUMERYCZNA ANALIZA STANÓW TERMO- MECHANICZNYCH W KOTLINIE ODKSZTAŁCENIA	48

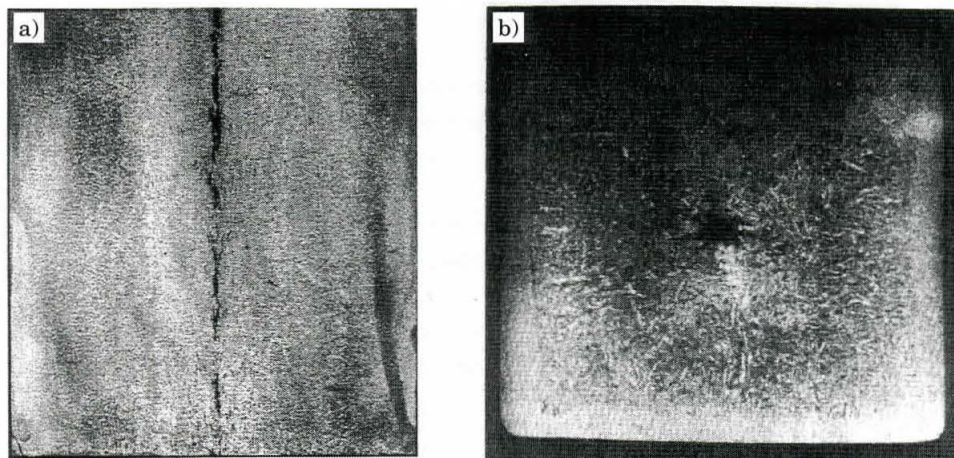
4.1. ANALIZA STANÓW MECHANICZNYCH W PRÓBKACH ODKSZTAŁCANYCH W SYMULATORZE TERMOMECHANICZNYM	48
4.1.1. Cechy geometryczne wsadu i narzędzi	48
4.1.2. Zdefiniowanie ruchu narzędzi i wstępnego położenia próbki względem narzędzi	49
4.1.3. Zdefiniowanie właściwości reologicznych materiału.	50
4.1.4. Zdefiniowanie warunków brzegowych.....	52
4.1.5. Wyniki symulacji stanów mechanicznych w kotlinie odkształcenia dla badań w symulatorze termo- mechanicznym	53
4.2. ANALIZA STANÓW MECHANICZNYCH W PRÓBKACH WALCOWANYCH W ZESPOLE WALCOWNICZYM.....	108
4.2.1. Cechy geometryczne wsadu i narzędzi	108
4.2.2. Zdefiniowanie ruchu narzędzi i wstępnego położenia próbki względem narzędzi	108
4.2.3. Zdefiniowanie właściwości reologicznych materiału.	108
4.2.4. Zdefiniowanie warunków brzegowych.....	108
4.2.5. Wyniki symulacji stanów mechanicznych procesu walcowania	109
4.3. ANALIZA ZJAWISKA ZAMYKANIA I ZGRZEWANIA WEWNĘTRZNYCH NIECIĄGŁOŚCI OSIOWYCH	134
5. BADANIA EKSPERYMENTALNE DLA RÓŻNYCH UKŁADÓW KALIBROWANIA.....	141
5.1. PROGRAM I METODYKA BADAŃ.....	141
5.2. KALIBROWANIE WYKROJÓW	145
5.3. STANOWISKA BADAWCZE	150
5.3.1. Symulator termomechaniczny	150
5.3.2. Zespół walcowniczy	151
5.4. MATERIAŁ BADAŃ	153
5.4.1. Próbkki do badań w symulatorze termomechanicznym ...	153
5.4.2. Pręty wsadowe do walcowania w zespole walcowniczym .	154
5.5. WYNIKI BADAŃ.....	154

5.6. BADANIA MIKROSKOPOWE WALCOWANYCH PRĘTÓW ...	157
5.6.1. Metodyka badań	157
5.6.2. Wyniki badań	158
5.7. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ.....	159
6. KONCEPCJA EFEKTYWNEGO WALCOWANIA WLEWKÓW Z COS	163
7. WNIOSKI	166
STRESZCZENIE	173

1. WPROWADZENIE

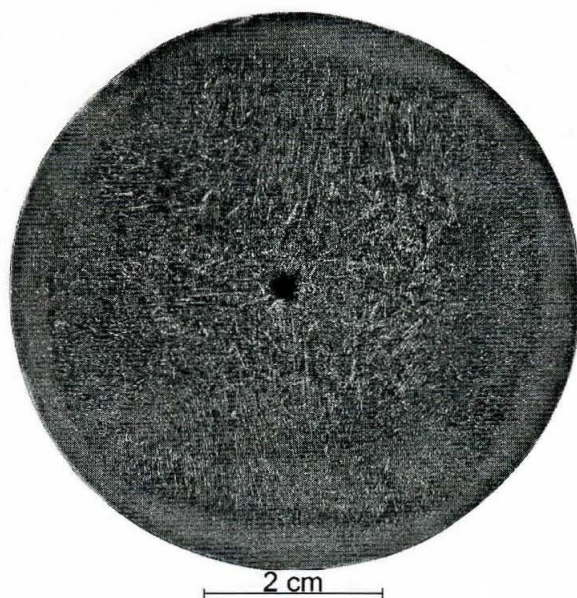
Rozwój technologii stosowanych w przemyśle hutnictwa żelaza spowodował w latach sześćdziesiątych XX wieku wdrożenie procesu ciągłego odlewania stali. Po osiągnięciu dojrzałości przemysłowej, co nastąpiło w latach siedemdziesiątych XX wieku proces odlewania ciągłego rozwija się intensywnie. Zmiany w procesie odlewania stali charakteryzowało szybkie przechodzenie z tradycyjnego odlewania wlewków na odlewanie ciągłe. Udział wlewków z COS w ogólnej produkcji hutniczej w świecie w 1970 roku wynosił tylko 4,3%, w 1990 roku już 59%, a w roku 2012 osiągnął poziom 98%. W Polsce szybki rozwój procesu ciągłego odlewania stali miał miejsce w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Wlewki z COS w 1992 roku stanowiły tylko 7,7% udziału w ogólnej produkcji hutniczej w Polsce, a już w roku 2001 stanowiły około 95%. Przyczyną szybkiego rozwoju procesu ciągłego odlewania stali są zarówno jego zalety ekonomiczne, jak i jakościowe w porównaniu z odlewaniem konwencjonalnym do wlewnic.

We wlewkach o przekroju kwadratowym i prostokątnym, odlewanych w sposób ciągły, stanowiących obecnie podstawowy rodzaj wsadu dla walcowni bruzdowych, występują wady w postaci wewnętrznych nieciągłości materiałowych, tj. pustka środkowa (osiowa), porowatość środkowa (rzadziejna osiowa), pęknięcia środkowe i inne. Główną przyczyną powstawania wewnętrznych nieciągłości materiałowych we wlewkach jest występowanie skurczu objętościowego, a zatem i liniowego odlanej stali. Pustka środkowa pokazana na rysunku 1.1, na przykładzie wsadu o przekroju kwadratowym 160 × 160 mm, ma postać szczelin rozciągniętych na długości osi środkowej wlewka ciągłego.

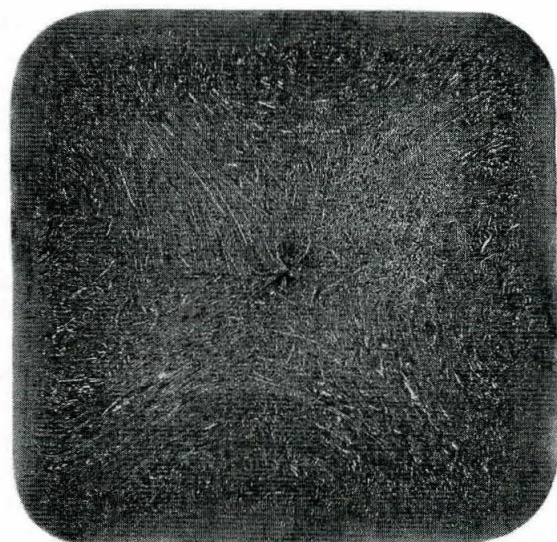


Rys. 1.1. Nieciągłości osiowe widoczne w przekrojach: a) wzdłużnym i b) poprzecznym

W praktyce przemysłowej, typowej dla współczesnych walcowni bruzdowych, wlewki z COS walcowane są z użyciem układów kalibrowania opracowanych dla wsadów w postaci kęsisk i kęsów wytwarzanych w walcowniach wstępnego przerobu. Wsad wstępnie walcowany (kęsiska i kęsy) charakteryzuje się wysokim stopniem przerobu, jednorodną strukturą, dobrą jakością powierzchni i zaokrąglonymi narożami. Natomiast wlewki z COS mają strukturę typową dla wyrobów odlewanych, cechującą się wewnętrznymi wadami w postaci nieciągłości materiałowych i pęknięć. Dodatkową wadą wlewków z COS są ostre naroża. Zastosowanie do takiego wsadu klasycznych systemów kalibrowania, szczególnie przy walcowaniu prętów i walcówki powoduje, że stany naprężeń i odkształceń powstające w kotlinie walcowniczej nie sprzyjają efektywnemu zamykaniu i zgrzewaniu nieciągłości materiału zlokalizowanych w osi wzdłużnej wlewków ciągłych. W zależności od rozmiarów nieciągłości osiowych, w szczególności pustki środkowej i wydłużenia całkowitego podczas walcowania, ale również od kształtu wykrojów i sposobu odkształcania, wady takie mogą być przyczyną pogorszenia właściwości wytrzymałościowych i plastycznych wyrobów walcowanych, a nawet mogą je dyskwalifikować. Przykładowe wady prętów okrągłych $\varnothing 63$ mm i kwadratowych $\square 60$ mm powstałe w następstwie pustek osiowych występujących we wlewkach ciągłych (rys. 1.1) przedstawiono na rysunkach 1.2÷1.4. Pręty były walcowane z wlewków ciągłych o przekroju kwadratowym 160×160 mm ze stali w ga-

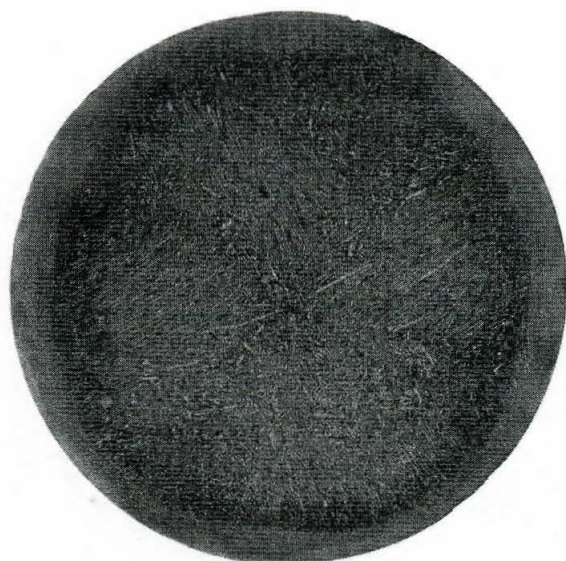


Rys. 1.2. Pustka środkowa w pręcie okrągłym $\varnothing 63$ mm walcowanym z wlewka ciągłego $\square 160$ mm



2 cm

Rys. 1.3. Pustka środkowa w przecie kwadratowym $\square 60$ mm walcowanym z wlewka ciągłego $\square 160$ mm



2 cm

Rys. 1.4. Porowatość środkowa w przecie okrągłym $\varnothing 60$ mm walcowanym z wlewka ciągłego $\square 160$ mm

tunku S355. Przedstawione na rysunkach makrostruktury prętów wykazały występowanie w środku przekroju poprzecznego nieciągłości w postaci pustki środkowej (rys. 1.2 i 1.3) lub porowatości środkowej (rys. 1.4). Średnica pustki środkowej wynosiła około 4 mm. W przypadku porowatości środkowej średnia średnica porów wynosiła około 0,5 mm. We wszystkich prętach widoczna jest pierwotna struktura dendrytyczna obejmująca większą część przekroju poprzecznego, za wyjątkiem warstwy podpowierzchniowej o grubości w zakresie od 3,5 mm do 6 mm.

Właściwości mechaniczne i strukturę wyrobów walcowanych można kształtować w procesie przeróbki plastycznej przez odpowiedni dobór parametrów prowadzonego procesu. W zależności od zastosowanych parametrów technologicznych procesu walcowania właściwości wyrobów można poprawić lub pogorszyć. Poszukiwanie nowych możliwości sterowania właściwościami materiału, w celu poprawy jakości wyrobów gotowych, przez wpływanie na warunki kształtowania jest obszarem intensywnych badań w wielu ośrodkach naukowo-badawczych [22, 23, 35, 41, 44-46, 51, 52, 55, 58, 59, 62-77].

Na strukturę i właściwości wyrobów walcowanych decydujący wpływ ma stan mechaniczny w kotlinie walcowniczej. Zatem poznanie stanów naprężeń i odkształceń w kotlinach walcowniczych o różnych kształtach i umiejętne sterowanie nimi umożliwi wyeliminowanie wielu wad, w tym w szczególności nieciągłości osiowych wyrobów walcowanych. Wpływ na intensywność zamykania i zgrzewania nieciągłości w walcowanym paśmie ma kształt i układ wykrojów, szczególnie w obszarze przepustów wstępnych.

Celem podjętych badań było określenie wielkości odkształcenia oraz schematów stanu naprężenia w paśmie stalowym odkształcanym w różnych wykrojach walcowniczych stosowanych w układach wstępnych walcowni bruzdowych produkujących pręty lub walcówkę, wyznaczenie stanów mechanicznych sprzyjających zamykaniu i zgrzewaniu wewnętrznych nieciągłości osiowych, znalezienie technologicznego sposobu odkształcania w procesie walcowania wywołującego taki stan naprężeń oraz podanie propozycji kształtu i układu wykrojów umożliwiających uzyskanie pożądaných stanów mechanicznych w kotlinie walcowniczej.

7. WNIOSKI

1. Powszechnie przyjmowanym wskaźnikiem oceny efektywności wpływu odkształcenia na strukturę i właściwości wyrobów jest stopień przerobu. Wielkość minimalnego stopnia przerobu, gwarantującego wymagane właściwości wyrobów walcowanych jest zróżnicowana, co jest następstwem zróżnicowanej jakości stosowanego wsadu, niejednoznaczności opisu odkształcenia przez stopień przerobu i zróżnicowania warunków w rzeczywistych procesach przeróbki plastycznej. Dlatego, w ocenie wpływu odkształcenia na strukturę wyrobu należy uwzględnić odkształcenia lokalne.
2. Szczegółowa analiza wpływu kształtu wykrojów i wielkości gniotu na rozkład naprężeń i odkształceń lokalnych potwierdza ścisłą zależność przebiegu procesu zamykania nieciągłości osiowej od wielkości naprężenia średniego. Ze wzrostem różnicy naprężeń średnich w skrajnych punktach na obwodzie nieciągłości wzrasta szybkość zmniejszania jej powierzchni przekroju. Warunkiem zamknięcia i zgrzania nieciągłości wewnętrznych jest uzyskanie w obszarze występowania wady odpowiednio dużego odkształcenia w warunkach korzystnego stanu naprężenia, charakteryzującego się dużym udziałem ujemnej składowej naprężeń średnich.
3. Zamknięcie nieciągłości nie jest jednoznaczne z jej całkowitą likwidacją, która następuje dopiero po zgrzaniu stykających się powierzchni wady. Na podstawie wyników badań zjawiska zgrzewania stwierdza się, że trwały efekt zgrzania nieciągłości wystąpi, gdy minimalna wielkość odkształcenia po zamknięciu nieciągłości ma wartość 0,15.
4. Wyniki badań weryfikacyjnych prowadzonych w symulatorze termomechanicznym i w doświadczalnym zespole walcowniczym wykazały, że spośród klasycznych wykrojów stosowanych w walcowniach bruzdowych najlepsze rezultaty w zakresie zamykania i zgrzewania osiowych nieciągłości materiałowych uzyskuje się stosując dla wsadu o przekroju kwadratowym wykroje skrzynkowe. Dla wykroju wstępnego o kształcie owalnym i stosunku szerokości owalu do wysokości równym 3, zamknięcie i zgrzanie nieciągłości uzyskano tylko dla wsadu o przekroju okrągłym. Z kolei zastosowanie w tym samym układzie wykrojów wsadu o przekroju kwadratowym dało najgorsze rezultaty, o czym świadczy otwieranie się wad po walcowaniu w wykroju okrągłym.
5. Badania modelowe odkształcania pasma w sposób odpowiadający założeniom przyjętym dla nowego wykroju, przeprowadzono w doświadczalnym zespole walcowniczym, wykorzystując klasyczne złożenia uniwersalne. Wyniki walcowania doświadczalnego potwierdziły możliwość uzyskania szybkiego zamknięcia nieciągłości osiowej i jej zgrzania, już w przepuszczeniu wstępnym. Opracowany nowy typ wykroju i nowy system wydłużający jest przystosowany do najczęściej używanego w walcowniach bruzdowych wsadu o przekroju kwadratowym.

6. Dla wsadu o przekroju kwadratowym najkorzystniejsze stany mechaniczne w kotlinie walcowniczej, zapewniające szybkie zamykanie i zgrzewania nieciągłości materiałowych, występują w wykrojach skrzynkowych. W przypadku zastosowania wykroju owalnego jako wykroju wstępnego i kalibrowania w układzie wydłużającym owal-okrągły, co bardzo często występuje w nowoczesnych walcowniach małych produkujących pręty i walcówkę, korzystne stany naprężenia i odkształcenia można uzyskać jedynie stosując wsad o przekroju okrągłym, który obecnie w ogóle nie jest używany w walcowniach bruzdowych. Stosowanie do wykroju owalnego wsadu kwadratowego powoduje wytworzenie stanu naprężeń niesprzyjającego zgrzewaniu nieciągłości, a co najwyżej ich zamykaniu. W przypadku nieodpowiednich cech geometrycznych wykroju owalnego dla tego typu wsadu nie dojdzie nawet do zamknięcia nieciągłości osiowych, a jedynie zmniejszenia ich objętości.
7. W procesie kalibrowania walców powszechnie wykorzystywane są znane zależności geometryczne i empiryczne, które nie uwzględniają lokalnych stanów naprężeń i odkształceń występujących w kotlinie walcowniczej. Zastosowanie metody elementów skończonych, opartej na przedstawionych modelach do analizy płynięcia materiału pasma odkształcanego w zaprojektowanych wykrojach i systemach wydłużających, umożliwi optymalizację poszczególnych wykrojów przez zmianę ich cech geometrycznych. Podstawą doboru kształtu i wymiarów wykroju są stany naprężenia i odkształcenia w kotlinie walcowniczej, sprzyjające zamykaniu i zgrzewaniu nieciągłości materiałowych.

WPŁYW STANÓW MECHANICZNYCH W KOTLINIE WALCOWNICZEJ NA ZAMYKANIE I ZGRZEWANIE NIECIĄGŁOŚCI WE WLEWKACH Z COS

STRESZCZENIE

Wlewki z procesu ciągłego odlewania stali (COS) mają strukturę typową dla wyrobów odlewanych, są obarczone wewnętrznymi wadami w postaci nieciągłości materiałowych, tj. pustka środkowa (osiowa), porowatość środkowa (rzadziła osiowa), pęknięcia środkowe i inne. Dodatkową wadą wlewków z COS są ostre naroża. Walcowanie takiego wsadu w klasycznych systemach kalibrowania, szczególnie przy walcowaniu prętów i walcówki powoduje, że stany naprężeń i odkształceń powstające w kotlinie walcowniczej nie sprzyjają efektywnemu zamykaniu i zgrzewaniu nieciągłości materiału zlokalizowanych w osi wzdłużnej wlewków ciągłych. W zależności od rozmiarów nieciągłości osiowych i od zastosowanych parametrów technologicznych procesu walcowania, wady takie mogą pogarszać właściwości wytrzymałościowe i plastyczne wyrobów walcowanych, a nawet mogą je dyskwalifikować. Poszukiwanie nowych możliwości sterowania właściwościami materiału, w celu poprawy jakości wyrobów gotowych, przez wpływanie na warunki kształtowania jest obszarem intensywnych badań w wielu ośrodkach badawczych [22, 23, 35, 41, 44-46, 51, 52, 55, 58, 59, 62-77]. Na strukturę i właściwości wyrobów walcowanych decydujący wpływ ma stan mechaniczny w kotlinie walcowniczej. Zatem poznanie stanów naprężeń i odkształceń w kotlinach walcowniczych o różnych kształtach i umiejętne sterowanie nimi umożliwia wyeliminowanie wielu wad, w tym w szczególności nieciągłości osiowych wyrobów walcowanych.

Celem podjętych badań było określenie wielkości odkształcenia oraz schematów stanu naprężenia w paśmie stalowym odkształcanym w różnych wykrojach walcowniczych stosowanych w układach wstępnych walcowni bruzdowych produkujących pręty lub walcówkę, wyznaczenie stanów mechanicznych sprzyjających zamykaniu i zgrzewaniu wewnętrznych nieciągłości osiowych, znalezienie technologicznego sposobu odkształcania w procesie walcowania wywołującego taki stan naprężeń oraz podanie propozycji kształtu i układu wykrojów umożliwiających uzyskanie pożądaných stanów mechanicznych w kotlinie walcowniczej.

W monografii zawarto kolejne etapy rozwiązania zagadnienia zamykania i zgrzewania nieciągłości osiowych obejmujące:

- rozpoznanie stanu wiedzy i stosowanych rozwiązań technicznych oraz technologicznych mających na celu likwidację nieciągłości materiałowych w procesie walcowania,

- numeryczną analizę stanów termomechanicznych w próbkach odkształcanych w symulatorze termomechanicznym,
- numeryczną analizę stanów termomechanicznych w próbkach walcowanych w zespole walcowniczym,
- analizę zjawiska zamykania i zgrzewania wewnętrznych nieciągłości osiowych na podstawie map stanów mechanicznych uzyskanych z symulacji numerycznej,
- badania eksperymentalne dla różnych układów i cech geometrycznych wykrojów wykonane metodami odkształcania próbek w symulatorze termomechanicznym i walcowania prętów w zespole walcowniczym ciągłym,
- badania próbek odkształconych w symulatorze i walcowanych w zespole walcowniczym pod kątem skuteczności zamknięcia i zgrzania nieciągłości osiowej wykonane metodami cyfrowej analizy obrazu i mikroskopii elektronowej.

Przeprowadzone rozpoznanie stanu wiedzy i stosowanych rozwiązań technicznych oraz technologicznych mających na celu likwidację nieciągłości materiałowych w procesie walcowania wskazuje, że rozwiązania problemu należy szukać w obszarze opracowania nowego systemu odkształcania, szczególnie w fazie przepustów wstępnych. Nowy system odkształcania powinien cechować się intensywnym zamykaniem nieciągłości, a po zamknięciu odkształcaniem, które w warunkach korzystnego stanu naprężeń doprowadzi do zgrzania nieciągłości. Pod pojęciem korzystnego stanu naprężenia rozumie się występowanie składowych naprężeń ściskających skierowanych prostopadłe do powierzchni rozdziału zamkniętej nieciągłości. Zamknięcie pustki środkowej w procesie walcowania jest efektem trudniejszym do uzyskania niż zamknięcie porowatości środkowej. Oznacza to, że jeżeli wystąpią korzystne warunki termomechaniczne, zapewniające zamknięcie i zgrzanie pustki środkowej, to na pewno nastąpi zamknięcie i zgrzanie porowatości środkowej.

Wyniki numerycznej analizy stanów termomechanicznych w różnych wykrojach w zależności od kształtu wsadu wykonane dla próbek odkształcanych w symulatorze termomechanicznym Gleeble i dla próbek walcowanych w doświadczalnym zespole walcowniczym ciągłym wykazują zbieżności w przypadku porównywania wyników uzyskanych dla poprzecznej płaszczyzny środkowej próbek odkształcanych w Gleeble i płaszczyzny wyjścia prętów walcowanych. Występujące różnice są wynikiem odmiennego płynięcia materiału w procesach ściskania w kowadłach kształtowych i walcowania w wykrojach. Na podstawie analizy wyników badań zjawiska zamykania i zgrzewania nieciągłości stwierdzono, że minimalna wielkość odkształcenia po zamknięciu nieciągłości zapewniająca trwały efekt jej zgrzania, wynosi 0,15. Stany naprężeń i odkształceń korzystne dla intensywnego zamykania i zgrzewania osiowych nieciągłości materiałowych charakteryzują się:

- odkształceniem zastępczym równomiernie rozłożonym na szerokości pasma i wzrastającym w kierunku środkowych warstw materiału pasma,

- wskaźnikiem stanu odkształcenia o wartości ujemnej z maksimum w osi odkształcanego pasma,
- składowymi normalnymi naprężenia odniesionymi do naprężenia uplastyczniającego o wartości ujemnej.

Porównanie wyników symulacji matematycznej i fizycznej wykazuje zgodność w zakresie uzyskanych efektów zamknięcia i zgrzewania nieciągłości osiowej. Intensywność zamknięcia i zgrzewania nieciągłości została określona po rozcięciu odkształconej próbki i wykonaniu pomiarów pola powierzchni wady. Stopień zmniejszenia nieciągłości odniesiono do wskaźników odkształcenia i stanów mechanicznych panujących w odkształcanej próbce. Zagadnienie zamykania nieciągłości w odkształcanym plastycznie materiale było przedmiotem analizy polegającej na badaniu wpływu warunków odkształcania, w tym wpływu kształtu wykroju na zmianę geometrii otworu symulującego wadę wewnętrzną i analizy lokalnych stanów mechanicznych w odkształcanym materiale. Metodyka badań wynikała z przyjętej hipotezy, że dominujący wpływ na możliwość zamykania i zgrzewania nieciągłości materiału ma wielkość odkształcenia zastępczego i wartość naprężenia średniego w obszarze wady. Ze względu na wymiary nieciągłości osiowych występujących we wlewkach ciągłych, które są bardzo małe w stosunku do wymiarów wsadu można przyjąć, że analiza lokalnego stanu naprężenia i odkształcenia w miejscu występowania wady umożliwia ocenę warunków sprzyjających likwidacji nieciągłości.

Spośród analizowanych klasycznych systemów wydłużających najkorzystniejsze dla procesu zamykania i zgrzewania nieciągłości materiałowych okazały się układy wykrojów skrzynkowych. Rozkłady odkształceń zastępczych w wykroju skrzynkowym, wskaźnika stanu naprężenia i składowych naprężenia normalnego przedstawiają się korzystnie, ze względu na ograniczone przez boczne ścianki wykroju, płynięcie materiału w kierunku poprzecznym (w kierunku szerokości). W tym wykroju dominują naprężenia ściskające, a odkształcenia w obszarze nieciągłości uzyskują wysokie wartości. W efekcie wykroj skrzynkowy zapewnia najbardziej korzystne warunki dla zamykania i zgrzewania osiowych nieciągłości materiałowych walcowanego wsadu.

Analiza stanów naprężenia i odkształcenia w kotlinach walcowniczych tworzących się podczas walcowania wsadu o przekroju okrągłym w układzie owal-okrągły, a szczególnie w przypadku wprowadzenia wsadu okrągłego do wykroju owalnego wykazała, że w całej objętości odkształcanego materiału bardzo szybko pojawiają się naprężenia ściskające. Ze względu na duży udział naprężeń ściskających materiał przemieszcza się do środka w kierunku otworu symulującego nieciągłość osiową. Uzyskiwane w tym przypadku duże wartości naprężeń ściskających i odkształceń w obszarze wady powodują szybkie jej zamknięcie, dzięki czemu jest dostatecznie dużo czasu na zgrzewanie zamkniętej nieciągłości w dalszej części kotliny walcowniczej. Jednak w przypadku wprowadzania wsadu o przekroju kwadratowym do wykroju owalnego, co jest praktyką w walcowniach przemysłowych, uzyskuje się skrajnie

niekorzystny rozkład naprężeń i odkształceń w kotlinie walcowniczej. W tym przypadku oprócz naprężeń ściskających w środkowych częściach górnego i dolnego boku kwadratu występują naprężenia rozciągające, które maleją do zera wraz z wypełnianiem wykroju. W skrajnie położonych punktach na obwodzie nieciągłości różnice wartości naprężenia średniego są mniejsze niż w przypadku zastosowania wsadu okrągłego, co wydłuża czas zamykania otworu. Przewaga naprężeń ściskających powoduje zamknięcie nieciągłości w końcowej części kotliny walcowniczej. Jednak zdecydowanie mniejsze wartości naprężeń ściskających i krótszy czas ich oddziaływania, niż w przypadku wsadu okrągłego, nie powodują zgrzania powierzchni nieciągłości. Zamknięcie nieciągłości nie jest jednoznaczne z jej całkowitą likwidacją, która następuje dopiero po zgrzaniu stykających się powierzchni wady. Brak zgrzania jest przyczyną ponownego otwarcia się nieciągłości przy wystąpieniu niekorzystnego stanu naprężenia w następnym przepuszczeniu, co potwierdzają wyniki badań modelowych w doświadczalnym zespole walcowniczym. Na podstawie wyników badań zjawiska zgrzewania stwierdza się, że trwały efekt zgrzewania nieciągłości wystąpi, gdy minimalna wielkość odkształcenia po zamknięciu nieciągłości ma wartość 0,15. Skuteczność zgrzewania nieciągłości jest uzależniona również od temperatury. Ze wzrostem temperatury maleją naprężenia uplastyczniające i zwiększa się szybkość dyfuzji, co ułatwia zgrzewanie powierzchni kontaktowych wady. We wsadach stalowych zgrzewanie nieciągłości następuje w temperaturach $\geq 1050^{\circ}\text{C}$. Zatem w procesie walcowania zgrzanie wady powinno nastąpić maksymalnie szybko, najlepiej już w przepuszczeniu wstępnym.

Przeprowadzone badania i analizy umożliwiły opracowanie nowego typu układu wydłużającego, opartego na złożeniu czterowalcowym. Kolejne wykroje tworzą system wydłużający prostokąt-kwadrat. Możliwość uzyskania stosunkowo dużych gniotów znacznie poprawia warunki zgrzewania materiału pasma, przez zwiększenie naprężenia i prędkości odkształcenia oraz intensyfikuje proces walcowania w stosunku do stanu obecnego. W poszczególnych wykrojach tego systemu przez zastosowanie złożów czterowalcowych występuje korzystne, z punktu widzenia rozkładu naprężeń i odkształceń, oddziaływanie na pasmo gniotu bocznego. Ponadto pasmo w tym systemie wydłużającym nie musi być kantowane lub skręcane względem osi wzdłużnej przed podaniem do następnego wykroju. Wyeliminowanie skręcania walcowanego pasma sprawia, że nie powstają w nim dodatkowe naprężenia skręcające, zwiększające wyężenie materiału, co jest szczególnie istotne podczas walcowania stali stopowych podatnych na pęknięcie. Nowy wykroj, a także zbudowany na jego bazie układ wydłużający, cechuje się dużą elastycznością i może być stosowany dla szerokiego asortymentu wymiarowego wsadów i walcowanych pasm.

INFLUENCE OF MECHANICAL STATES IN ROLL GAP ON CLOSURE AND WELDING OF DISCONTINUITIES IN CONTINUOUSLY CAST STRANDS

SUMMARY

Concast strands' structure is typical for cast products, moreover these are burdened with internal defects in form of material discontinuities, i.e. central (axial) void, central porosity (axial porosity), central cracks and other. Additional defect of concast strand are sharp corners. Rolling of such charge material, in classical calibration systems, especially during rolling of bars and wire rod results in the fact that stress and strain states generated in roll gap do not foster effective closure and welding of material discontinuities located in longitudinal axis of concast strand. Depending on size of axial voids and applied technological parameters of rolling, such defects may deteriorate mechanical and plastic properties of rolled long products, and ultimately disqualify these. Search for new possibilities of controlling material properties in order to improve quality of finished products by influencing the conditions of deformation, is an object of intensive research investigations in numerous research centres [22, 23, 35, 41, 44-46, 51, 52, 55, 58, 59, 62-77]. Mechanical state in roll gap has a decisive influence on the structure and properties of rolled products. Therefore, recognizing of the states of stress and strain in the roll gap of different shapes as well as skilful control of these, make enable the elimination of numerous defects, special of axial voids of rolled long products.

The aim of the research was definition of the value of deformation in steel strand deformed in different rolling passes used in rough train of bar mills producing bars or wire rods, determination of mechanical states fostering closure and welding of axial discontinuities, finding out of technological method of deformation in the rolling process which would evoke the desired strain state and develop of the proposal of shape and setting of passes facilitating achievement of desired mechanical states in the roll gap.

The monograph contains subsequent stages of solution of the issue of closing and welding axial discontinuities covering:

- analysis of the present knowledge and applied technical and technological solutions aimed at liquidation of material discontinuities in rolling process,
- numerical analysis of thermo-mechanical states in samples subject to deformation in thermo-mechanical simulator,
- numerical analysis of thermo-mechanical states in samples rolled in a rolling mill,

- analysis of the phenomenon of closing and welding of internal axial discontinuities based on maps of mechanical states obtained from numerical simulation,
- experimental research for various sequences and geometric features of rolling passes performed by means of sample deformation in thermo-mechanical simulator and rolling of bars in a continuous rolling mill,
- tests of samples deformed in simulator and rolled in the rolling mill in point of view of efficiency of closing and welding axial discontinuity performed with digital image analysis and electron microscopy methods

The conducted recognition of present knowledge and applied technical and technological solutions aimed at liquidation of material discontinuities in rolling process, indicates that solution of the problem should be searched for in the area of development of new system of deformation, especially in the former rolling passes. New system deformation should be characterized by intensive closure of discontinuities, and after closure, by deformation, which, in the conditions of favourable stress state, shall lead to welding of discontinuities. Favourable stress state is understood as occurrence of constituent compressive stresses directed perpendicularly to the surface of closed discontinuity separation. Closure of central void in the rolling process is more difficult than closure of central porosity. It means that if favourable thermo-mechanical conditions are occur, which ensure closure and welding of central void, then definitely also the central porosity will be closed and welded.

Results of numerical analysis of thermo-mechanical states in various rolling passes depending on the shape of charge material performed for samples deformed in thermo-mechanical simulator Gleeble, and for samples rolled in experimental rolling mill, show conformity in case of comparison of results obtained for transverse central plane of samples deformed in Gleeble and exit plane of the rolled bars. The existing differences result from different flow of material in compression processes in shaped die and rolling in passes. Based on analysis of results of tests of closing and welding of discontinuities it was stated that the minimum value of deformation following closure of discontinuity which ensures permanent welding thereof, is 0.15. Stress and strain states favourable for intensive closure and welding of axial material discontinuities, are characterized by:

- reduced strain evenly spread on the width of strand and increasing towards central layers of strand material,
- factor of stress state about negative value with maximum in the axis of deformed strand,
- stress components referred to field stress of negative value.

Comparison of the results of mathematical and physical simulation indicates conformity in scope of the obtained results of closing and welding of axial discontinuity. Intensity of closure and welding of discontinuity was determined by slitting the deformed sample and measurements of the defect surface

area. Degree of discontinuity reduction was compared to strain ratios and mechanical states in the deformed sample. The issue of closing discontinuity in the material subject to plastic strain was subject to analysis consisting in examination of the impact of strain conditions, in that the influence of the pass shape on change in the geometry of the hole simulating internal defect, and analysis of local mechanical states in the deformed material. Methodology of research stemmed from the adopted hypothesis that the value of equivalent strain, and average stress in the area of defect has dominant influence on the possibility of closing and welding material discontinuity. Due to sizing of axial discontinuities present in concast strands, which are relatively small, as compared to sizing of charge material, one may assume that analysis of local state of stress and strain in the location of defect facilitates assessment of the conditions fostering liquidation of discontinuities.

Amongst the analyzed classical elongation systems, box passes proved to be the most favorable for the process of closure and welding of material discontinuities. Distributions of equivalent strain in box pass, stress state index and constituents of normal stress seem to be favourable due to limited transverse material flow (in the direction of width) by the pass walls. In this pass compressive stresses are dominant; deformations in discontinuity zone achieve high values. Effectively, box pass ensures the most favourable conditions for closure and welding of axial material discontinuities of the rolled charge material.

Analysis of stress and strain states in roll gaps formed during rolling of round charge material (oval-round pass sequences), and especially in the case of introduction of round charge material to oval pass, has shown that compressive stress emerges very quickly in the entire volume of the deformed material. Due to high share of compressive stress, material moves towards the centre, towards the hole simulating axial discontinuity. High values of compressive stress and strain in the area of defect achieved in this case, result in fast closure thereof, owing to which there is sufficient time available for welding of closed discontinuity in the further part of roll gap. In the case of square charge material introduction to oval pass, which is used in industrial mills, extremely unfavourable distribution of stress and strain is obtained in roll gap. In this case, apart from compressive stresses in central parts of upper and lower side of square, tensile stress occurs, which is reduced to zero along with filling up of the pass. In the points located extremely on the circumference of discontinuity, differences in the value of average stress are lower than in the case of round charge material, which extends the time of hole closure. Advantage of compressive stress results in closure of discontinuity in the final section of roll gap. Anyway, significantly lower values of compressive stresses and shorter time of their impact, as compared to the round charge material, do not result in welding of the surface of discontinuity. Closure of discontinuity is not equivalent to its entire liquidation, which occurs only after welding

of adjoining surfaces of defect. Lack of welding is the reason for subsequent opening of discontinuity in the case of occurrence of unfavourable stress state in the following pass, which is confirmed by model tests in experimental rolling mill. Based on the results of tests of the phenomenon of welding, it is ascertained that permanent effect of discontinuity welding will occur when minimum value of strain following closure of discontinuity reaches the value of 0.15. Effectiveness of discontinuity welding depends also on temperature. Along with increase in the temperature, field stress is reduced and rate of diffusion increases, which facilitates welding of contact surfaces of defect. In steel charge material welding of discontinuity occurs at temperatures of $\geq 1050^{\circ}\text{C}$. Therefore in the rolling process, welding of the defect ought to be effected as soon as possible, best of all as early as in the breakdown pass.

The conducted research and analyses facilitated development of new type of elongation system based on universal 4 rolls setting. Subsequent passes form elongation system rectangle-square. The possibility of obtaining relatively high reduction in height considerably improves the conditions of strand material welding by increasing stress and strain rate and intensifies the rolling process as compared to the present state. In following passes of the said system, positive (from the perspective of stress and strain distribution) influence of indirect draft on the strand occurs owing to application of universal four roll settings. Moreover, the strand in this elongation system does not have to be turned or subject to torsion vs. longitudinal axis prior to move to the following pass. Elimination of torsion of the rolled strand results in the fact that additional torsional stress which increase material effort are not generated; that is especially important during rolling of alloy steel sensitive to cracking. New rolling pass as well as break down sequence of passes set on its basis, is characterized by high flexibility and may be used for wide range of dimensions of charge material and rolled strands.

