

## SYMULACJA USZKODZENIA ZGORZELINY PODCZAS WIELOPRZEPUSTOWEGO WALCOWANIA STALI NA GORĄCO ORAZ ZWIĄZANYCH Z TYM DEFECTÓW WYROBU

M. KRZYŻANOWSKI, J.H. BEYNON

### *SIMULATION OF OXIDE SCALE FAILURE DURING MULTIPASS HOT ROLLING AND RELATED PRODUCT DEFECTS*

#### *Abstract*

*The advanced physically based finite element model of the roll-stock interface developed at earlier stages of the research for a single rolling pass has been extended to provide the basis for detailed numerical investigations of the roll/stock interface behaviour during multi-pass hot rolling operations. The research encompassed the following consecutive stages: modelling of the combined hot compression-tension test followed by multi-pass hot rolling modelling of the steel strip having the same thickness. Longitudinal tension was added as a technological parameter. The possibility of a co-operative relationship between the formation of oxide scale related defects at the upper and lower faces and formation of shear zones within the steel strip has been demonstrated numerically. The observed effect is more pronounced for thin or ultra-thin hot rolled strips, such as 0.8 - 1.0 mm in thickness. It has been shown that the through-thickness shear zones within the material can link the scale related defects on both the upper and lower strip surfaces. Formation of the scale related shear zones within the strip volume takes place mainly during the second rolling pass. These zones remain within the strip volume after spallation of the scale fragments. A single scale fragment remaining on the strip surface after the first rolling pass can influence formation of the shear zones during consecutive rolling passes.*

## 1. WPROWADZENIE

Poznanie zjawisk zachodzących w skali mikro w obszarze warstwy przygranicznej pomiędzy narzędziem i kęsiskiem płaskim ma podstawowe znaczenie przy określeniu wymiany ciepła oraz tarcia podczas walcowania stali na gorąco (Li i Sellars, 1996). Po usunięciu zgorzeliny pierwotnej przed walcowaniem wstępnym, powstaje zgorzelina wtórna podczas przejścia metalu pomiędzy kolejnymi przepustami, która

ulega odkształceniu razem z warstwą powierzchnią wyrobu co może doprowadzić do uszkodzenia jej jednolitości. Powstałe w zgorzelinie na skutek pęknięć nieszczelności mogą doprowadzić do bezpośredniego kontaktu w kotlinie walcowniczej pomiędzy gorącym metalem a zimnym narzędziem. Powoduje to znaczące zmiany warunków wymiany ciepła oraz tarcia w tym obszarze ze względu na duże różnice współczynników przewodzenia ciepła stali i zgorzeli-ny (Chen i in., 1993). W ostatnich latach został opra-

M. Krzyżanowski<sup>1</sup>, J.H. Beynon<sup>1,2</sup>, <sup>1</sup>Institute for Microstructural and Mechanical Process Engineering: The University of Sheffield, UK; <sup>2</sup> now at Faculty of Engineering and Industrial Sciences, Swinburne, University of Technology, Melbourne, Australia

cowany model matematyczny termomechaniczny opierający się na metodzie elementów skończonych (MES), pozwalający na symulacje mikro zjawisk w strefie przygranicznej pomiędzy narzędziem a kęśnikiem płaskim (Krzyżanowski i in., 2001). Uwzględnienie tych zjawisk przy modelowaniu numerycznym bardzo komplikuje się zmianą własności zarówno zgorzeliny jak i powierzchni rozdziału zgorzelina/metal w zakresie temperatur walcowania stali na gorąco. W dodatku sama zgorzelina stali nie jest morfologicznie jednorodną, składa się z poszczególnych warstw o różnej ziarnistości oraz porowatości, zazwyczaj zawiera dużo pustek (Krzyżanowski i Beynon, 1999a). Dane doświadczalne wskazują na to, że w zakresie temperatur 800–1150°C zmienia się charakter pęknięcia zgorzeliny stali niskowęglowej, od typowo kruchego do lepkiego w temperaturach wyższych. W wysokich temperaturach adhezyjne własności zgorzeliny maleją, co doprowadza do poślizgu pomiędzy metalem a zgorzeliną. Ten poślizg, przewidywany jako poślizg lepki w warunkach adhezyjnego kontaktu zgorzeliny z metalem, analogicznie do poślizgu wzdłuż granic ziaren w procesie pełzania wysokotemperaturowego, jest różny od poślizgu oddzielonego fragmentu zgorzeliny który występuje w przypadku przekroczenia parametrów krytycznych (Krzyżanowski i Beynon, 1999b). Spoistość pomiędzy poszczególnymi warstwami wewnątrz układu metal/wielowarstwową zgorzelina oraz rozkład naprężeń powstałych podczas rozwarstwienia tego układu decydują o lokalizacji płaszczyzny poślizgu podczas odkształcenia. Zarówno własności zgorzeliny jak i powierzchni rozdziału w rozpatrywanym układzie w dużym stopniu zależą od składu chemicznego stali oraz warunków wzrostu zgorzeliny. Zależność ta jest na tyle znacząca, że najmniejsze zmiany w składzie chemicznym, nie powodujące widocznych zmian w kinetyce wzrostu w zakresie czasu powstawania zgorzeliny wtórnej, powodują wyraźne, widoczne nie uzbrojonym okiem różnice stanu zgorzeliny po odkształceniu próbki (Krzyżanowski i Beynon, 2000).

Cały szereg czynników ma wpływ na własności wyrobu po walcowaniu stali na gorąco, z których wiele jest związanych ze zgorzeliną. Opracowany model matematyczny pozwala również na przewidywanie jakości powierzchni wyrobu, która staje się obecnie coraz ważniejszą własnością w warunkach odkształcenia na gorąco. Defekty powierzchni spowodowane włączaniem metalu przez popękana na wskroś zgorzelinę, technologie usuwania zgorzeliny, zarówno powstawanie zgorzeliny na walcach z późniejszym złuszczeniem się jak i przejście wragmentów zgorzeliny wtórnej na walce z oddziaływaniem na powierzchnie wyrobu są zagadnieniami zasługującymi na szczególną uwagę. Model matematyczny został opracowany stopniowo

w oparciu o przeprowadzenie szeregu pomiarów laboratoryjnych, walcowania materiałów, badań mikrostruktury połączonych, co jest szczególnie istotne, z dokładną numeryczną analizą zjawisk obserwowanych drogą doświadczalną podczas badań laboratoryjnych. Wykorzystany początkowo do analizy rozwoju pęknięć w jednowarstwowej zgorzelinie podczas walcowania na gorąco stali niskostopowej (Krzyżanowski i in., 2000), model został rozszerzony o uwzględnienie zgorzeliny wielowarstwowej (Krzyżanowski i in., 2003a), później o uwzględnienie przejścia fragmetów popękanej zgorzeliny z materiału poddawanego obróbce termomechanicznej na powierzchni narzędzia (Krzyżanowski i in., 2005) oraz wykorzystany dalej do poznania mechanizmu usuwania zgorzeliny drogą zarówno mechanicznego jak i hydraulicznego procesów usuwania (Krzyżanowski i in., 2003b). Opracowany model zajmuje również istotne miejsce w badaniach zmiany adhezyjnych własności zgorzeliny materiałów o różnym składzie chemicznym w warunkach wysokotemperaturowych (Beynon i in., 2005).

Celem niniejszej pracy jest wykorzystanie modelu do poznania procesów rozwoju uszkodzeń wewnątrz materiału, uszkodzeń również związanych ze zgorzeliną wtórną podczas walcowania na gorąco taśmy o małej grubości ze stali niskostopowej. Problem związany jest z tym, że minimalna grubość wyrobu przy walcowaniu konwencjonalnym w dniu dzisiejszym już osiągnęła wartość 1.2 mm, natomiast grubość taśmy ultra-ciękiej, produkowanej na walcierce "mini" wykorzystując technikę walcowania bez końca jest jeszcze mniejszą i zbliża się do 0.8 mm (Nikaido i in., 1997). W takich warunkach warstwa przygraniczna do powierzchni materiału, w której powstają defekty związane z włączaniem metalu poprzez popękana na wskroś zgorzelinę zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni taśmy, ma grubość porównywalną z grubością wyrobu. Poznanie procesów rozwoju tych niejednorodności pozwoli w przyszłości uniknąć związanych z tym defektów wyrobu.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY

Analiza numeryczna bazująca się na metodzie elementów skończonych zajmuje centralne miejsce w niniejszej pracy oraz reprezentuje kolejne wykorzystanie opracowanego modelu matematycznego do poznania zjawisk ściśle uzależnionych od precyzyjnego przewidywania zachowania się zgorzeliny stali podczas odkształcenia w warunkach walcowania na gorąco. Model składa się z części "makro", która zazwyczaj związana jest z obliczeniem temperatury, odkształcenia, prędkości odkształcenia, rozkładu naprężeń w procesie przeróbki materiału, oraz z części "mikro", która bezpośrednio jest odniesiona do zgo-

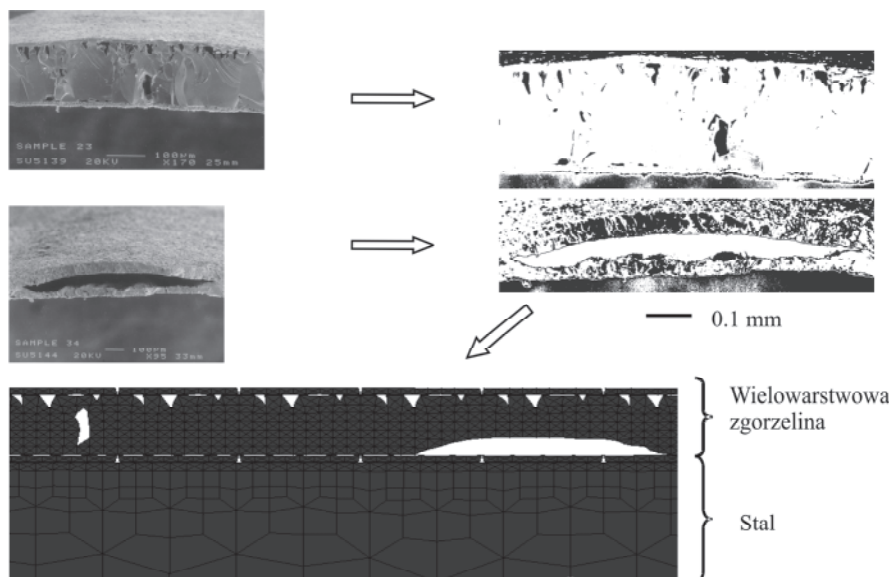


rzeliny umieszczonej na powierzchni materiału poddawanemu przeróbce plastycznej.

## 2.1. Model "mikro"

Podstawowe matematyczne założenia modelu termomechanicznego zgorzeliny zostały przedstawione wcześniej (Krzyżanowski i in., 2001, 2003a) i będą omówione zwięźle w celu zachowania harmonijnej całości pracy. Obrazy zgorzeliny utworzone przy użyciu mikroskopu elektronowego scanningowego, przez elektrony wstecznie rozproszone oraz stosując metodę dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych pozwalają na precyzyjne uwzględnienie typowych szczegółów morfologicznych zgorzeliny podczas konfiguracji modelu MES takich jak różne strukturalne warstwy, pustki, chropowatość powierzchni rozdziału zgorzelina/metal oraz proporcję różnych warstw w strukturze zgorzeliny, która jest uzależniona od składu chemicznego stali, temperatury oraz czasu wzrostu zgorzeliny (rys. 1). Uwzględnienie tych szczegółów pozwala na dokładne przewidywanie rozwoju uszkodzeń w zgorzelinie. Większe pustki, pęcherze, przeważnie usytuowane pomiędzy warstwami zgorzeliny, dość często stanowią zarodki rozwoju pęknięć. Fragmenty zgorzeliny przed odkształceniem są połączone razem w celu utworzenia spójnej warstwy zgorzelinowej. Długość poszczególnych wragmentów w modelu dobiera się tak, aby były one krótsze od najkrótszego z fragmentów obserwowanych doświadczalnie, co pozwala na przewidywanie rozwoju pęknięć w zgorzelinie. Przyjęto, że kontakt pomiędzy fragmentami oraz pomiędzy zgorzeliną a powierzchnią metalu następuje po zmniejszeniu odległości do wartości krytycznej, uzależnionej od skali rozpatrywanego zjawiska. Każdy element składa się z izoparametrycznych, trójkątnych lub czworokątnych elementów dwu-wymiarowych.

Dopasowanie lub nastawienie modelu na szczególną konfigurację zgorzeliny wybranego gatunku stali jest krokiem niezbędnym do prawidłowej symulacji jej zachowania się podczas odkształcenia. Taki krok obejmuje również nastawienie własności termomechanicznych zgorzeliny oraz granicy rozdziału zgorzelina/metal. Wiele z tych własności, takich jak zależności modułu Young'a od temperatury, poszczególnych składowych zgorzeliny oraz jej porowatości, współczynniki przewodzenia oraz wymiany ciepła, współczynniki dyfuzji oraz chropowatości powierzchni rozdziału zgorzelina/metal ta inne są przyjmowane



Rysunek 1. Schematyczna reprezentacja wprowadzenia do modelu MES charakterystycznych osobliwości morfologii zgorzeliny stali niskostopowej.

bazując na danych literaturowych oraz zostały szczegółowo omówione wcześniej. Natomiast obciążenia rozdzielcze, jako parametry krytyczne odpowiedzialne za rozwój pęknięcia w układzie zgorzelina/metal są parametrami charakterystycznymi dla danego układu. Mierzone one podczas uszkodzenia zgorzeliny w próbie na rozciąganie (Krzyżanowski i Beynon, 2002). Przeprowadzenie takich pomiarów jest zagadnieniem w znacznym stopniu utrudnionym ze względu na kilka powodów. Po pierwsze, wartości obciążeń rozdzielczych są stosunkowo małe. Po drugie, punkty rejestrowania obciążeń znajdują się w znacznej odległości od miejsca powstawania pęknięcia, mianowicie, w obszarze główek próbki. Po trzecie, w miejscu gdzie powstaje pęknięcie, na krawędzi próbki, występują lokalne niejednorodności temperatury, odkształceń oraz naprężeń. Zastosowanie modelowania MES do numerycznej analizy danych pomiarowych w znacznym stopniu podwyższa dokładność analizy. Dopasowywanie przewidywanych oraz mierzonych obciążeń daje możliwość określenia obciążeń rozdzielczych w rozpartywanym układzie zgorzelina/metal, które są później przeliczane w miarę prędkości uwolnienia energii odkształcenia oraz wprowadzane do modelu jako kryterium do rozwoju pęknięcia. W przypadku kruchego rozwoju pęknięcia, zazwyczaj występującego w zgorzelinie stali niskostopowej w temperaturach poniżej 800°C, przeważnie stosuje się odkształcenie krytyczne. Natomiast, jeżeli pęknięcie rozwija się w zgorzelinie zachowującej się nieliniowo lub plastycznie, co może występować w temperaturach wyższych, w modelu jest przewidywana możliwość obliczenia całki  $J$ , jako kryterium do rozwoju pęknięcia. W modelu zostało również przyjęto, że tylko jeden kontur całki  $J$  uwzględnia się dla każdej powierzchni





rozdziálu oraz nie stosuje się specjalnej techniki czwartkowania wokół punktu osobliwości w wierzchołku pęknięcia. W metodzie są stosowane tylko pochodne elementów zarówno odwrotnego Jakobiana  $J^{-1}$  jak i wyznaczniku Jakobianu  $[J]$  (poszczególne symbole mają swoje zwykłe znaczenie):

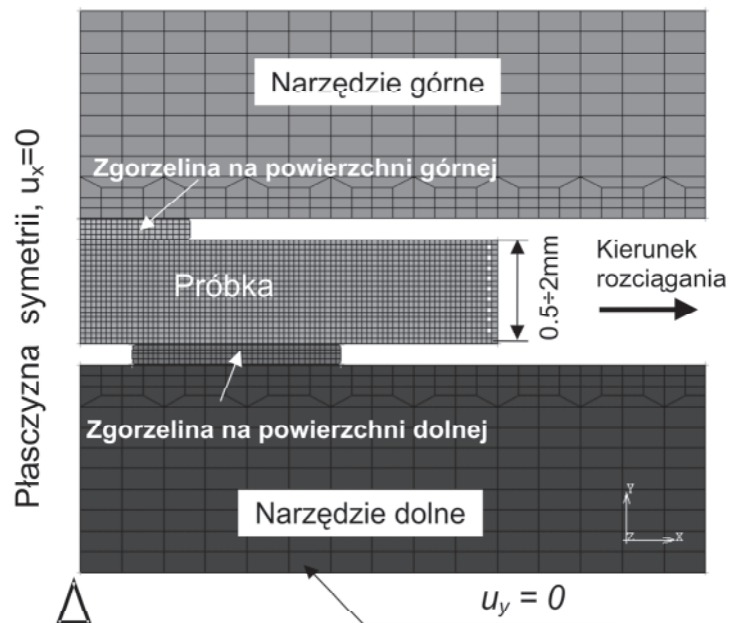
$$\delta W^e = \int_{V^0} \left( W \delta |J| + \sigma_{ij} \delta J_{jk}^{-1} \frac{\partial u_i}{\partial \eta_k} [J] \right) dV^0 \quad (1)$$

Stosowanie tej metody obliczenia rozwoju pęknięcia, dokładnie opisanej gdzie indziej (Bakker, 1983), pozwala na łatwiejszą symulację rozwoju pęknięcia wzdłuż powierzchni rozdziálu w układzie zgorzelina/metal. Dla rozwiązania MES niestacjonarnego zagadnienia ciepła, rozwoju odkształcenia, lepkiego poślizgu oraz pęknięcia zgorzeliny w różnych temperaturach wykorzystano komercyjny pakiet MSC/MARC 2000 przyjmując płaski stan odkształcenia. Uwolnienie węzłów zostało zorganizowane przy pomocy dodanych podprogramów w taki sposób, że długość powstałego pęknięcia określa się w każdym kroku czasowym, zatem uwalniane są warunki brzegowe wywołując program standardowy dla węzła o właściwym numerze.

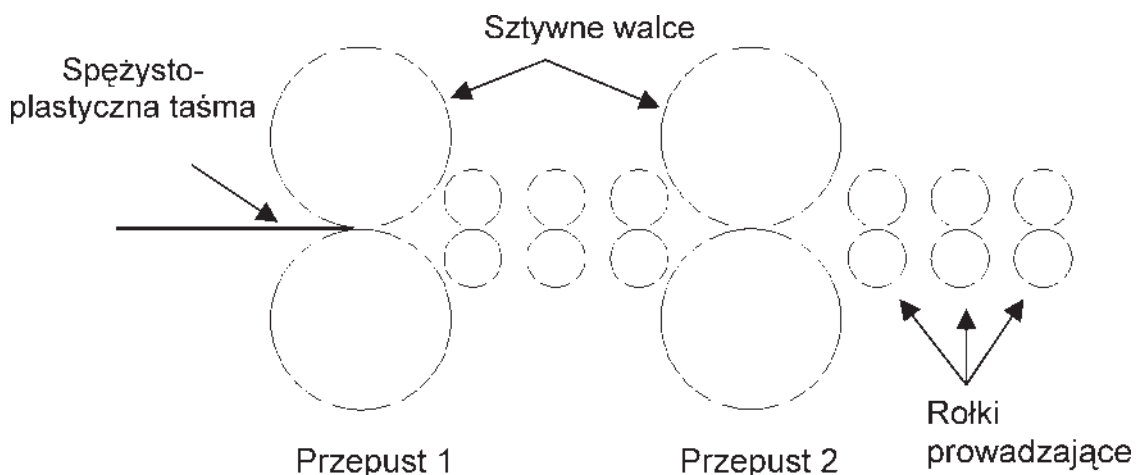
## 2.2. Modele "makro"

Badania numeryczne zostały przeprowadzone w następnej kolejności. Najpierw, pojedyncze fragmenty zgorzeliny były umieszczone odpowiednio na górnej i dolnej powierzchni modelu próbki poddawanej próbie na ściskanie z kolejnym rozciąganiem próbki w kierunku prostopadłym do kierunku ściskania (rys. 2). Rozciąganie próbki po jej wstępnym ściskaniu symulowano ze względu na naprężenie wzdłużne które występuje jako parametr technologiczny zarówno w technice walcowania bez końca jak i przy walcowaniu konwen-

cjonalnym. Następnym krokiem było symulowanie odkształcenia modelu próbki, również zawierającej pojedyncze fragmenty, podczas walcowania na gorąco. W tym celu stosowano model makro walcowania przez dwa przepusty (rys. 3). Jednym ze szczegółów tego modelu było zastosowanie rołków prowadzących taśmę do kolejnego przepustu aby uniknąć nieporządnego wygięcia materiału. Rysunek 4 ilustruje kształt modelowanej taśmy podczas walcowania bez rołków oraz przy ich zastosowaniu. Wygięcie taśmy następuje ze względu na powstawanie niejednorodnych naprężeń wewnątrz próbki po przechodzeniu przepustu. Kolejną osobliwością tego modelu było zastosowanie do modelowania materiału taśma izoparametrycznych zarówno trójkątnych jak i czworokątnych elementów dwu-wymiarowych. Zastosowanie elementów trójkątnych w obrzarze wartsy przygranicznej do zgorzeliny pozwoliło na podwyższenie stabilności rozwiąza-

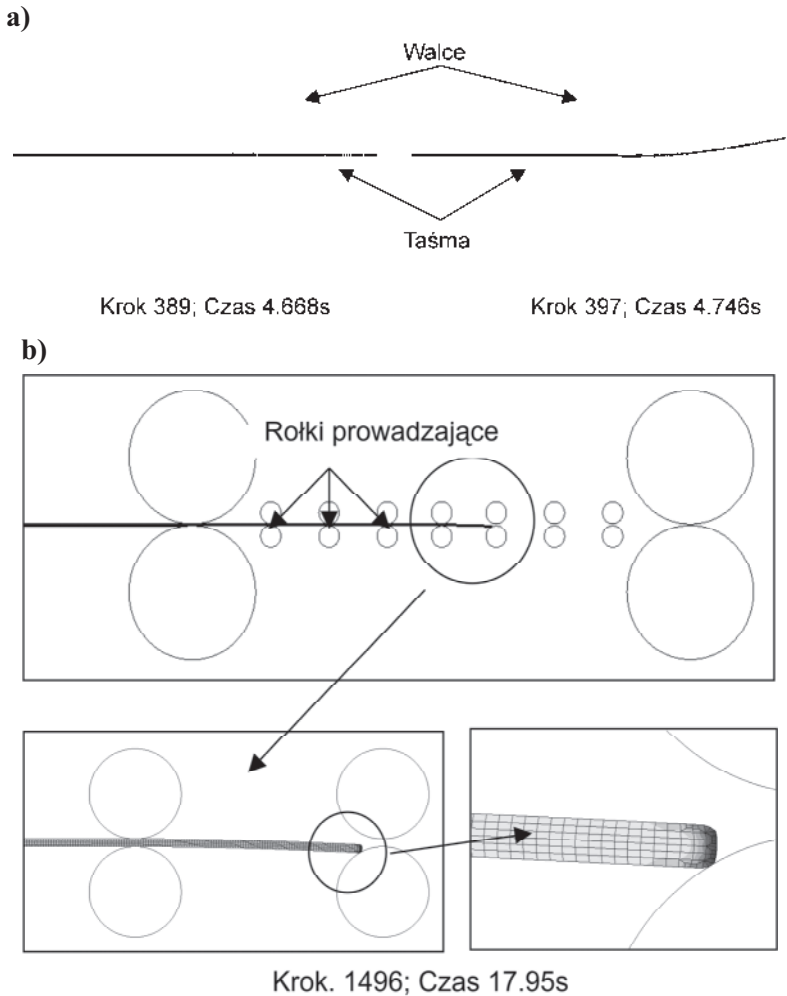


Rysunek 2. Układ modelu próby na ściskanie z kolejnym rozciąganiem w kierunku prostopadłym do kierunku ściskania.



Rysunek 3. Układ modelu dwuprzepustowego walcowania na gorąco.





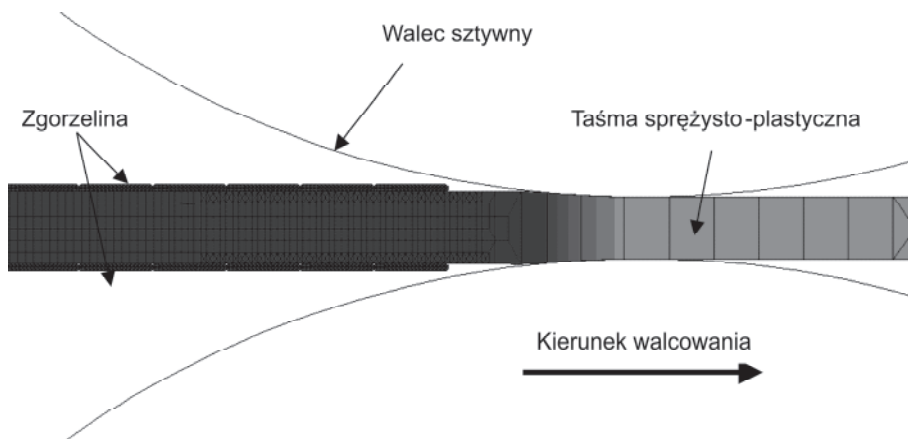
Rysunek 4. Kształt taśmy podczas walcowania na gorąco przewidywany bez zastosowania (a) oraz z zastosowaniem (b) rolków prowadzących.

nia numerycznego ze względu na powstawanie w tym obszarze poważnych odkształceń ścinających. Natomiast stosowanie elementów o kształcie czworokątnym ułatwiło identyfikację powstawania stref ścinania podczas odkształcenia. Ostatnim etapem analizy numerycznej była symulacja odkształcenia taśmy zawierającej początkowo spójną warstwę zgorzelinową

umieszczoną zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni materiału (rys. 5). Podczas modelowania podstawowe parametry modelu zmieniano w następującym zakresie: grubość taśmy  $0,5 \div 2$  mm; grubość zgorzeliny  $10 \div 100$   $\mu\text{m}$ ; temperaturę  $800 \div 1100^\circ\text{C}$ ; dodatkowo naprężenie rozciągające  $10 \div 15$   $\text{N/mm}^2$ . Materiałem do symulowania wybrano stal niskostopową własności której zostały wprowadzone do modelu na podstawie danych literaturowych podobnych do tych, które są wykorzystane w modelach walcowania na gorąco (Pietrzyk i Lenard, 1991). Przeprowadzenie analizy w kolejności od zastosowania stosunkowo prostej konfiguracji modelu oraz symulacji efektów związanych z odkształceniem pojedynczych fragmentów zgorzeliny do zastosowania modelu zaawansowanego uwzględniającego pękanie oraz uszkodzenie spójnej warstwy zgorzelinowej podczas kilka przepustowego walcowania na gorąco pozwala na poznanie mechanizmu rozwoju niejednorodności w strukturze materiału związanych ze zgorzeliną oraz na możliwości przewidywania związanych z tym defektów wyrobu.

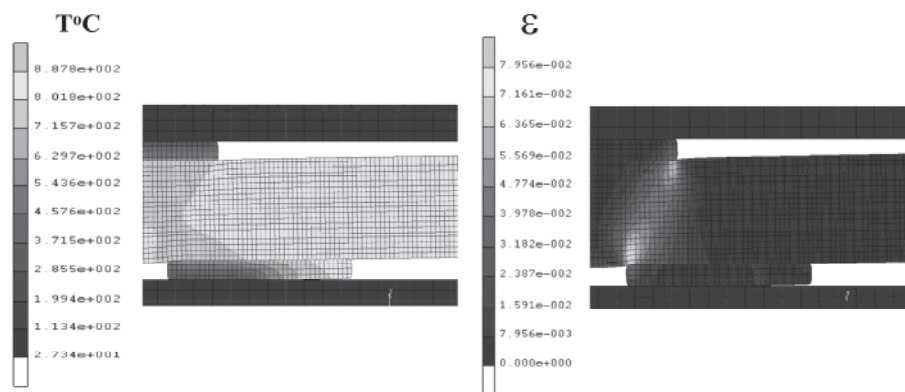
### 3. OBLICZENIA NUMERYCZNE

Obliczenia pola temperatur w materiale, wykonane dla przypadku próby na ściskanie oraz przedstawione na rysunku 6a, wskazują na to, że niejednorodności w rozkładzie temperatur powstają już w momencie kontaktu zgorzeliny z zimnym nadzędziem. Jak widać, strefa obniżonej temperatury łączy fragmenty zgorzeliny na górnej i dolnej powierzchni próbki. W ciągu ściskania w materiale próbki tworzy się strefa odkształcenia również łącząca fragmenty zgorzeliny (rys. 6b). Grubość zgorzeliny, w tym przypadku, celowo wybrano maksymalną,  $100\mu\text{m}$ , aby umożliwić wyraźną ilustrację efektu. Charakter odkształcenia materiału w próbie ściskania wskazuje na to, że w obszarze strefy niejednorodnego odkształcenia w pobliżu zgorzeliny mogą powstawać warunki do formowania stref ścinania, które również pozostają po kolejnym rozciąganiu próbki, o czym świadczą wyniki obliczeń przedstawione na rysunku 7. Zniekształcone elementy materiału na tym rysunku, zdefiniowane jako elementy skończo-



Rysunek 5. Układ modelu walcowania na gorąco taśmy z początkowo spójną warstwą zgorzelinową umieszczoną zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni materiału.





Rysunek 6. Rozkład temperatury (a) oraz odkształcenia zastępczego (b) przewidywany w materiale próbki poddawanej ścisnaniu na gorąco.

ne w których kąty wewnętrzne są odchyłone od  $90^\circ$  więcej niż na  $15^\circ$ , zostały wydzielone innym kolorem. Zniekształcenie materiału w sposób ścinający sprzyja powstawaniu pasm ścinania w strukturze materiału, o czym świadczą badania doświadczalne (Harren i in., 1988). Jak wskazują wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej, na powstawanie stref ścinania w próbce ścisnania związanych ze zgorzeliną mają wpływ następujące czynniki: położenie fragmentu zgorzeliny na górnej powierzchni próbki względnie usytuowania zgorzeliny na powierzchni dolnej, przyłożenie naprężenia rozciągającego po odpowiednim ścisnaniu oraz temperatura odkształcenia. Jak widac, przy odpowiednim usytuowaniu fragmentów zgorzeliny może dochodzić do pojednania stref zniekształcenia w jedną strefę łączącą fragmenty zgorzeliny na dolnej i górnej powierzchni próbki (rys. 8a, b). Dodatkowo przyłożenie naprężenia rozciągającego zazwyczaj doprowadza do powiększenia wymiarów strefy (rys. 8c, d). Temperatura, chociaż i w mniejszym stopniu, również powiększa liczbę zarejestrowanych zniekształconych elementów.

Obliczenia odkształcenia taśmy podczas walcowania na gorąco wykonano dla dwóch kolejnych przepustów (rys. 9). W tym przypadku tylko dwa pojedyncze fragmenty zgorzeliny były umieszczone przed obliczeniem odpowiednio na górnej i dolnej powierzchni taśmy. Widać, że w trakcie przechodzenia pierwszego przepustu fragmenty zgorzeliny odkształcają się razem z materiałem taśmy. Natomiast, po przechodzeniu następnego przepustu obserwuje się częściowe odłupywanie się pojedynczych fragmentów zgorzelinowych od powierzchni metalowej. Zaobserwowany efekt jest związany z tym, że w pewnym momencie odkształcenia nastąpiło przekroczenie warunków krytycznych do powstawania i rozwoju pęknięcia wzdłuż powierzchni rozdziału zgorzelina/materiał taśmy. Przy modelowaniu tego zjawiska w odpowiednich warunkach może dochodzić do całkowitego odłupywania się fragmentów zgorzeliny oraz przechodzenie ich na powierzchnie materiałów wal-

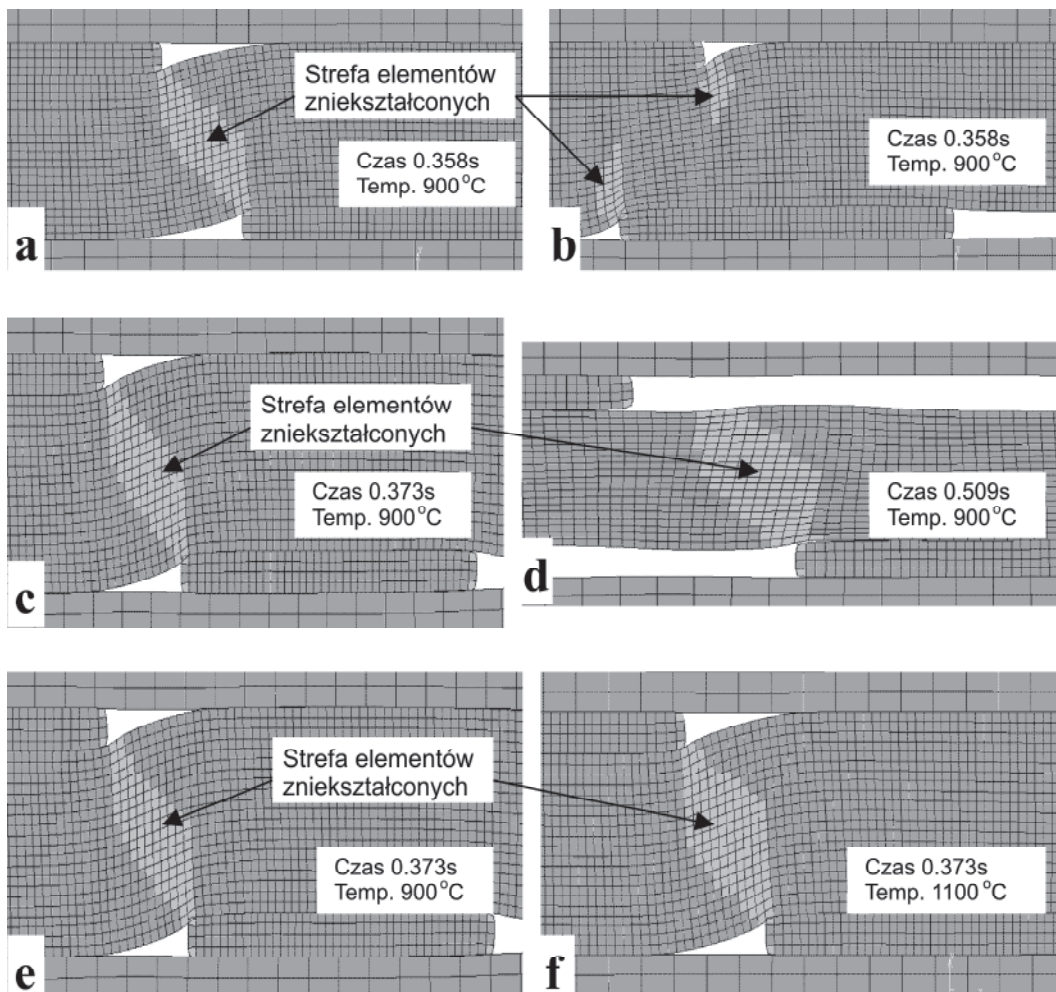
ca. Wynika to na skutek tego, że w pewnym momencie obciążenia rozdzielcze wzdłuż powierzchni walec/zgorzelina taśmy stają się większe od odpowiednich obciążeń wzdłuż powierzchni rozdzielającej zgorzelinę od materiału taśmy (efekt znany z angielskiego jako "roll pick up effect" (Krzyżanowski i in., 1005). Na rysunku 10 zostały przedstawione strefy ścinania w materiale taśmy po przechodzeniu kolejnych przepustów przewidywane przy zastosowaniu tej samej konfiguracji

modelu dla różnego względnego usytuowania pojedynczych fragmentów zgorzeliny na powierzchni taśmy. Jak widać, strefy zniekształconych elementów, zdefiniowane w sposób identyczny poprzedniemu przypadkowi próby na ścisnanie, tworzą się w materiale taśmy przeważnie podczas odkształcenia w przepście drugim, za wyjątkiem zaznaczonych elementów trójkątnych, w których wprowadzony warunek odchylenia kątów wewnętrznych nie jest odnoszący się do rozpatrywanego efektu. Podczas walcowania na gorąco, zarówno jak i podczas odkształcenia w próbce na ścisnanie, może dochodzić do pojednania stref zniekształcenia wywołanych fragmentami zgorzeliny znajdującymi się po obydwu powierzchniach taśmy. Na tym samym rysunku można również zauważyć, że nawet pojedynczy fragment zgorzelinowy umieszczony na powierzchni taśmy może doprowadzić do powstawania efektu zniekształcenia elementów po przechodzeniu drugiego przepustu. Jeżeli podczas przechodzenia przepustu dochodzi do odłupywania się zgorzeliny, utworzony efekt zniekształcenia pozostaje nadal w materiale taśmy.

Ostatnim etapem analizy numerycznej było również modelowanie odkształcenia taśmy podczas walcowania na gorąco wykonane dla dwóch kolejnych przepustów. W odróżnieniu od poprzedniego przypadku, zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni taśmy została umieszczona początkowo spójna warstwa zgorzelinowa. Tym razem powstawanie pęknięć oraz niednorodności w zgorzelinie podczas odkształcenia były przewidywane numerycznie. Jak widać z wyników przedstawionych na rysunku 11, przy wejściu do kotliny walcowniczej pierwszego przepustu w materiale taśmy tworzy się klasyczny obraz rozkładu odkształcenia zastępczego symetryczny odnośnie płaszczyzny przebiegającej przez centrum taśmy. Widać, że przy wejściu do kotliny walcowniczej pęknięcia w zgorzelinie, zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni taśmy, powstają również w sposób symetryczny na skutek symetrycznego powstawania naprę-



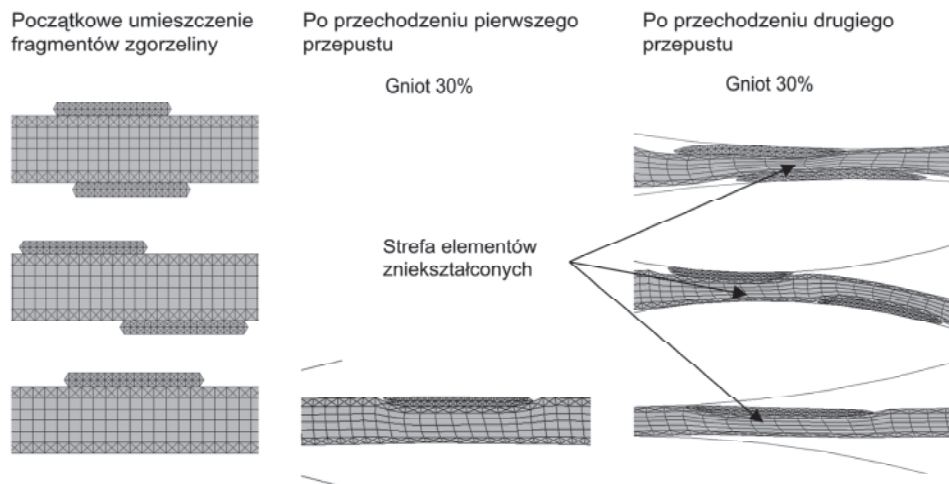




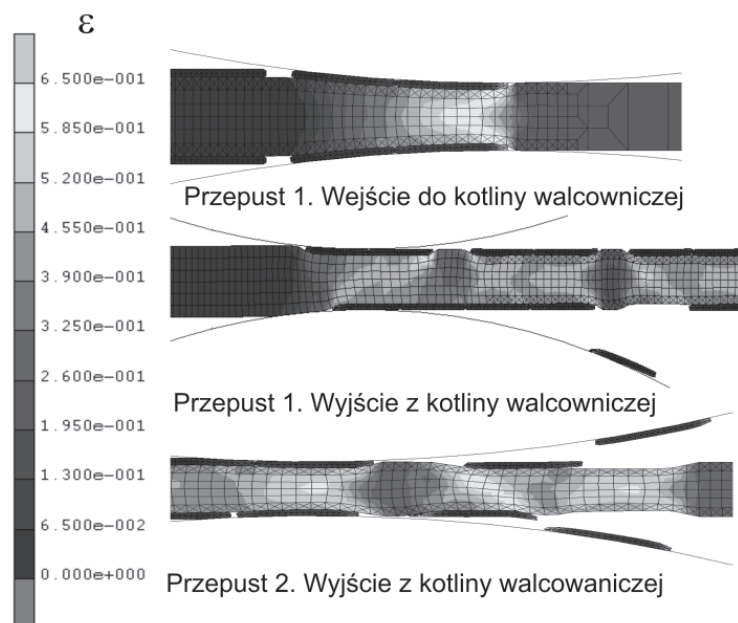
Rysunek 8. Strefy ścinania w materiale próbki poddawanej ściskaniu na gorąco z kolejnym rozciąganiem przewidywane dla różnego względnego usytuowania fragmetów zgorzeliny na powierzchni próbki (a, b), bez lub po przyłożeniu naprężenia rozciągającego (c, d) oraz różnej temperatury początkowej (e, f).

Rysunek 9. Rozkład odkształcenia zastępczego przewidywany w materiale taśmy poddawanej walcowaniu na gorąco po przechodzeniu kolejnych przepustów. Dwa fragmenty zgorzeliny początkowo były umieszczone na górnej i dolnej powierzchni taśmy.





Rysunek 10. Formowanie stref ścinania w materiale taśmy poddawanej walcowaniu na gorąco po przechodzeniu kolejnych przepustów przewidywane dla różnego względnego usytuowania pojedynczych fragmentów zgorzeliny na powierzchni taśmy.

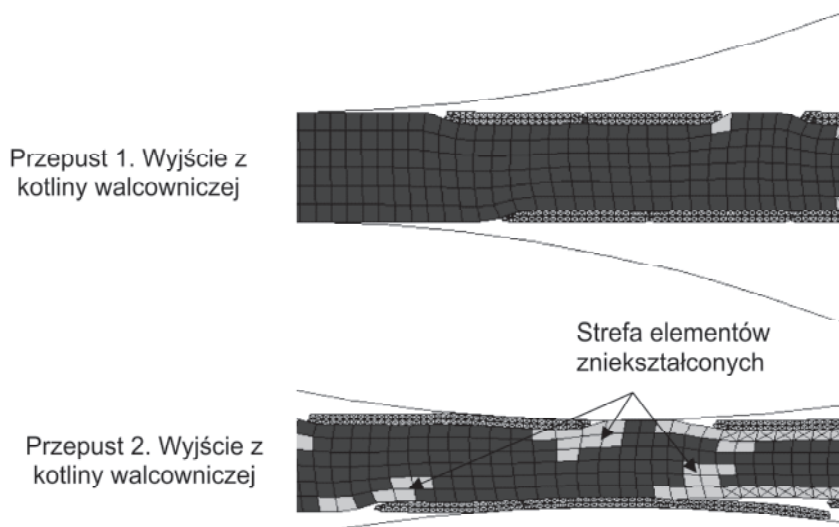


Rysunek 11. Rozkład odkształcenia zastępczego przewidywany w materiale taśmy poddawanej walcowaniu na gorąco po przechodzeniu kolejnych przepustów. Grubość taśmy 1mm; grubość zgorzeliny 100 μm; gnioł 20%.

żeń rozciągających w tym obszarze. Symetryczny sposób odkształcenia taśmy zmienia się już po przechodzeniu pierwszego przepustu w wyniku nieregularnego powstawania nieszczelności w zgorzelinie górnej i dolnej powierzchni taśmy. Związane jest to z niejednorodnym rozwojem pęknięć w zgorzelinie w wyniku wprowadzonych na początku nieregularnych osobliwości morfologicznych zgorzeliny, takich jak pustki, chropowatość powierzchni rozdziału zgorzelina/metal oraz proporcję różnych

warstw w strukturze zgorzeliny. Pozwala to na przewidywanie zachowania się zgorzeliny w sposób maksymalnie zbliżony do rzeczywistego. W tych warunkach modelowania również zostało pokazane, że w trakcie przechodzenia taśmy przez drugi przepust walcowniczy mogą powstawać strefy zniekształconych elementów materiału podobne do opisanych powyżej stref ścinania (rys. 12). Takie strefy tworzą się w powierzchniowych warstwach przekroju poprzecznego taśmy, które znajdują się w miejscach zbliżonych do nieszczelności powstałych w zgorzelinie podczas walcowania. Przewidywanie stref zniekształcenia w materiale taśmy pozwoli na poznanie procesów rozwoju niejednorodności w strukturze materiału poddanemu walcowaniu na gorąco co swoją drogą pozwoli w przyszłości uniknąć związanych z tym defektów wyrobu.

#### 4. PODSUMOWANIE



Rysunek 12. Formowanie stref ścinania w materiale taśmy poddawanej walcowaniu na gorąco po przechodzeniu kolejnych przepustów przewidywane dla początkowo spójnej warstwy zgorzeliny umieszczonej zarówno na górnej jak i na dolnej powierzchni taśmy. Grubość taśmy 1mm; grubość zgorzeliny 100 μm; gnioł 20%.



Badano mechanizm powstawania stref ścinania w taśmie ze stali niskostopowej związanych z uszkodzeniem zgorzeliny wtórnej podczas wieloprzepustowego walcowania na gorąco. Do analizy numerycznej, opierającej się na metodzie elementów skończonych, zastosowano opracowany wcześniej model matematyczny zgorzeliny, który został zweryfikowany zarówno w warunkach modelowania prób pomiarów własności zgorzeliny jak i walcowania na gorąco. Obliczenia numeryczne obejmowały symulacje próby na ściskanie z następującym rozciąganiem w kierunku prostopadłym do kierunku ściskania połączonych z modelowaniem walcowania taśmy na gorąco przez dwa przepusty. Badania przeprowadzono zarówno dla pojedynczych fragmentów zgorzeliny jak i dla spójnej warstwy zgorzelinowej umieszczonej odpowiednio na górnej i dolnej powierzchni taśmy. Wykonana analiza wskazuje na możliwości powstawania stref ścinania w warstwach powierzchniowych taśmy związanych z uszkodzeniem spójności zgorzeliny podczas odkształcenia. Identyfikowano strefy ścinania jako obszary odpowiednio zniekształconych elementów skończonych. Zaobserwowany efekt jest bardziej widoczny przy modelowaniu walcowania taśmy o małej grubości, około 1 mm i mniejszej. Powstawane strefy zniekształconych elementów w obszarach materiału przylegających do fragmentów popękanej zgorzeliny mogą łączyć się przy odpowiednim usytuowaniu fragmentów na górnej i dolnej powierzchni taśmy kształtując strefy przechodzące na wskroś przez przekrój poprzeczny taśmy. Uzyskane wyniki wskazują na to, że strefy zniekształconych elementów tworzą się w materiale taśmy przeważnie podczas odkształcenia w przepuszczeniu drugim. Obserwowano również, że nawet pojedynczy fragment zgorzelinowy umieszczony na powierzchni taśmy może doprowadzić do powstania efektu zniekształcenia elementów, który pozostaje w materiale taśmy w przypadku odłupywania się zgorzeliny podczas przechodzenia przepustu.

Uwaga końcowa: Praca wykonana w ramach grantu Komitetu do badań w zakresie nauk inżynierskich oraz fizycznych Wielkiej Brytanii. (Research Grant GR/R70514/01, EPSRC UK)

## LITERATURA

- Bakker, A., 1983, An analysis of the numerical path dependence of the J-integral, *Int. J. Pres. Ves. & Piping*, C14, 153-179.
- Beynon, J.H., Krzyżanowski, M., Taranets, N., 2005, Surface Scale Evolution in the Hot Rolling of Steel, *Invited Keynote at "HSLA Steels 2005 and ISUGS 2005"*, 8-10 November, Sanya, Hainan, China, 2005.
- Chen, W.C., Samarasekera, I.V., Kumar, A., Hawbolt, E.B., 1993, Mathematical modelling of heat flow and deformation during rough rolling, *Ironmaking and Steelmaking*, 20, No. 2, 113-125.
- Harren, S.V., Déve, H.E., Asaro, R.J., 1988, Shear band formation in plane strain compression, *Acta metall.*, Vol. 36, No. 9, 2435-2480.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 1999a, The tensile failure of mild steel oxides under hot rolling conditions, *Steel Research*, 70, No. 1, 22-27.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 1999b, Finite element model of steel oxide failure during tensile testing under hot rolling conditions, *Mat. Sci. Techn.*, 15, 1191-1198.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 2000, Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing - oxide scale behaviour and composition effects, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 8, 927-945.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., Sellars, C.M., 2000, Analysis of secondary oxide scale failure at entry into the roll gap, *Metall. Mater. Trans.*, 31B, 1483-1490.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., Sellars, C.M., 2001, Numeryczna symulacja zachowania się zgorzeliny wtórnej w warunkach przeróbki stali na gorąco oraz w procesach usuwania zgorzeliny, *Informatyka w Technologii Materiałów*, 1, No. 3-4, 153-165.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 2002, Measurement of oxide properties for numerical evaluation of their failure under hot rolling conditions, *J. Mat. Proc. Techn.*, 125-126, 398-404.
- Krzyżanowski, M., Sellars, C.M., Beynon, J.H., 2003, a Characterisation of oxide scale in thermomechanical processing of steel, *Proc. Int. Conf. On Thermomechanical Processing: Mechanics, Microstructure & Control*, 23-26 June 2002, ed., Palmiere, E.J., Mahfouf, M., Pinna, C., The University of Sheffield, 94-102.
- Krzyżanowski, M., Yang, W., Sellars, C.M., Beynon, J.H., 2003b, Analysis of Mechanical Descaling: Experimental and Modelling Approach, *Mat. Sci. Techn.*, 19, 109-116.
- Krzyżanowski, M., Trull, M., Beynon, J.H., 2005, Roll pick-up investigations - experimental and modeling, *Mat. II. Symp. Plasticity and its Current Applications: PLASTICITY '05*, Kauai, Hawaii, USA, ed., Khan, A.S., Khoei, A.R., Neat Press, Fulton, Maryland, USA, 2005, 106-108.
- Li, Y.H., Sellars, C.M., 1996, Modelling deformation behaviour of oxide scales and their effects on interfacial heat transfer and friction during hot steel rolling, *Mat. 2. Konf. Modelling of Metal Rolling Processes*, ed., Beynon, J.H., Ingham, P., Teichert, H., Waterson, K., The Institute of Materials, London, 192-206.
- Nikaido, H., Isoyama, S., Nomura, N., Hayashi, K., Morimoto, K., Sakamoto, H., 1997, Endless Hot Strip Rolling in the No. 3 Hot Strip Mill at the Chiba Works, *Kawasaki Steel Technical Report*, No. 37, 65-72.
- Pietrzyk, M., Lenard, J.G., 1991, *Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process*, Heidelberg: Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Artykuł otrzymano ....

