

## NUMERYCZNA SYMULACJA ZACHOWANIA SIĘ ZGORZELINY WTÓRNEJ W WARUNKACH PRZERÓBKI STALI NA GORĄCO ORAZ W PROCESACH USUWANIA ZGORZELINY

MICHAŁ KRZYŻANOWSKI, JOHN H. BEYNON, C. MICHAEL SELLARS

### *NUMERICAL SIMULATION OF SECONDARY OXIDE SCALE IN HOT ROLLING AND DESCALING OPERATIONS*

#### *Abstract*

*The research reported here concerns the behaviour of the oxide scale that on steels, undergoing hot rolling. By doing a closely-linked combination of laboratory testing and measurements, rolling tests, microstructural investigation and, crucially, detailed finite element analysis, a physically-based model for oxide scale behaviour has been developed. The model has been successfully applied to circumstances similar to those in which it was developed, namely hot rolling of steel, importantly, it has also been applied to completely different circumstances - high temperature hydraulic descaling and room temperature mechanical descaling with considerable success. This is an affirmation of the integrity of the model. It is also an example of how a combination of techniques can allow materials to be characterised in circumstances where standard methods of measurement are not feasible or adequate on their own.*

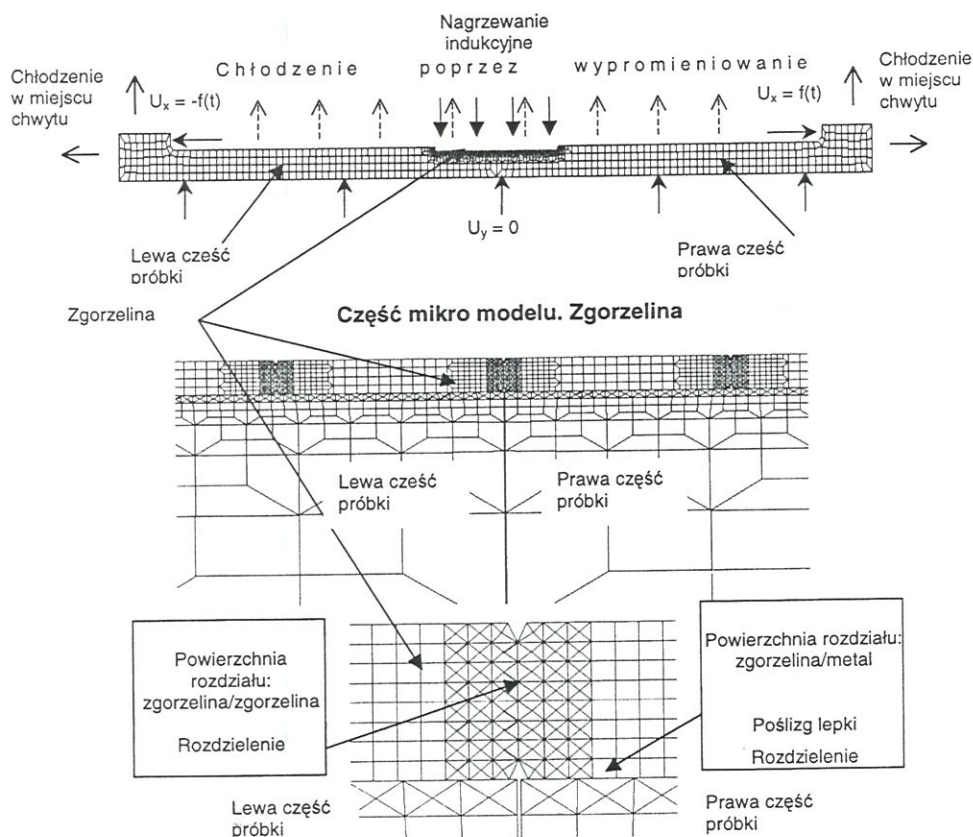
### 1. WPROWADZENIE

Motywacją do badań zgorzeliny podczas odkształcenia w wysokich temperaturach było dążenie do lepszego poznania zjawisk zachodzących się w skali mikro, w obszarze warstwy przygranicznej pomiędzy narzędziem i kęsiskiem płaskim. Zjawiska te mają wpływ na wymianę ciepła oraz na tarcie podczas walcowania stali na gorąco. W odróżnieniu od warunków charakteryzujących się temperaturą pokojową czy też podwyższoną, które występują podczas eksploatacji elementów maszyn gdzie zgorzelina odgrywa rolę powłoki ochronnej, okazało się, że istnieje niewiele

danych dotyczących zachowania się zgorzeliny podczas walcowania stali na gorąco. W warunkach przemysłowych kęsisko płaskie nagrzewane jest w piecu i dalej poddawane walcowaniu wstępnemu. Utworzona w piecu zgorzelina pierwotna usuwana jest przed walcowaniem wstępnym. Podczas przejścia metalu pomiędzy kolejnymi przepustami powstaje zgorzelina wtórna. Odkształcenie, któremu ulega warstwa powierzchniowa pasma przed wejściem do kotliny walcowniczej, wywołuje naprężenia rozciągające w kierunku walcowania, które mogą doprowadzić do uszkodzenia jednolitości zgorzeliny wtórnej. Jest to bardzo istotne ze względu nie tylko na znaczące róż-

*M. Krzyzanowski, J.H. Beynon, C.M. Sellars, The University of Sheffield, Department of Mechanical Engineering (IMMPETUS), Sir Frederic Mappin Building, Mappin Street, Sheffield S1 3JD, UK*

### Część makro modelu próby rociągania na gorąco



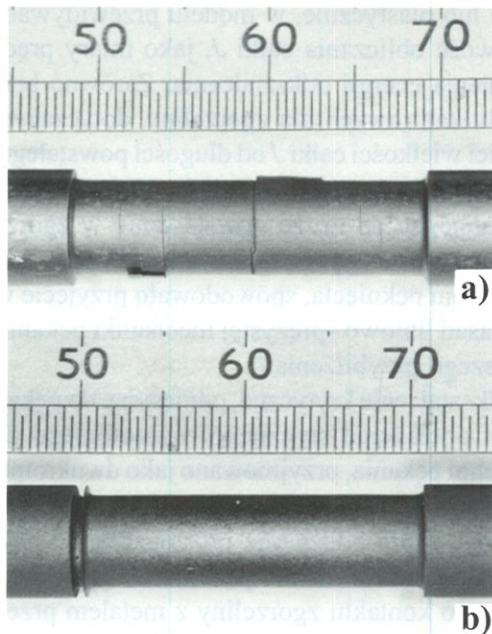
Rysunek 1. Układ modelu oraz schematyczna reprezentacja siatki elementów skończonych.

nice współczynników przewodzenia ciepła stali i zgorzeliny (rzędu 10–15 razy, Chen i in. 1993), ale również dlatego, że dwa inne zjawiska zachodzą w zakresie temperatur 800–1150°C. Powstałe w zgorzelinie pęknięcia lub inne nieszczelności mogą doprowadzić do bezpośredniego kontaktu pomiędzy gorącą powierzchnią metalu a zimnym narzędziem na skutek właczania metalu przez popękana na wskroś zgorzelinę w kierunku zimnej powierzchni walca (Li i Sellars 1996). Poza tym, istnieją przesłanki na to, że w wysokich temperaturach adhezyjne własności zgorzeliny maleją, co może doprowadzić do poślizgu pomiędzy metalem a zgorzeliną, obserwowanym na przykład podczas jednoosiowego rozciągania utlenionej próbki stalowej (Krzyżanowski i Beynon 1999a). W dodatku sama zgorzelina stali niskostopowej zazwyczaj nie jest morfologicznie jednorodna i składa się z poszczególnych warstw FeO (zazwyczaj FeO + Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oraz Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> o różnej ziarnistości oraz porowatości (Tan i in. 2001). Lokalizacja płaszczynny poślizgu podczas odkształcenia jest uwarunkowana spoistością pomiędzy poszczególnymi warstwami wewnątrz układu metal/wielowarstwowa zgorzelina oraz rozkładem naprężeń powstałym podczas jego rozwarstwienia. Zarówno pęknięcie jak i poślizg zgorzeliny wprowadzają znaczące zmiany do procesów wymiany ciepła oraz tarcia w kotlinie walcowniczej.

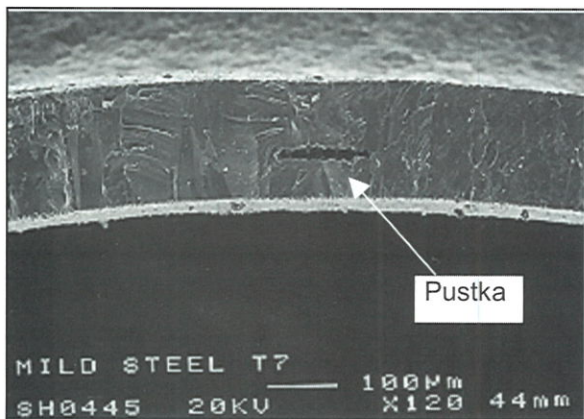
## 2. MODEL MATEMATYCZNY

Model matematyczny zgorzeliny opierający się na metodzie elementów skończonych, zaproponowany początkowo do analizy uszkodzenia zgorzeliny podczas walcowania na gorąco (Krzyżanowski i in. 2000), później zastosowany do badań mechanizmu usuwania zgorzeliny (Krzyżanowski i Beynon 2000b), wykorzystany jest w tej pracy, w połączeniu z próbą na rozciąganie, do ustalenia najbardziej krytycznych parametrów układu zgorzelina–metal. Są to parametry charakterystyczne dla wybranego gatunku stali oraz dla danych warunków wzrostu i odkształcenia zgorzeliny. Część modelu „makro”, przedstawiona na rysunku 1, oblicza temperaturę, odkształcenie, prędkość odkształcenia oraz rozkład naprężeń w rozciąganej próbce. Część modelu „mikro”, odniesioną do zgorzeliny, umieszczono na powierzchni sekcji pomiarowej modelu próbki. Ta część modelu poddawana jest uzupełnianiu oraz weryfikacji.

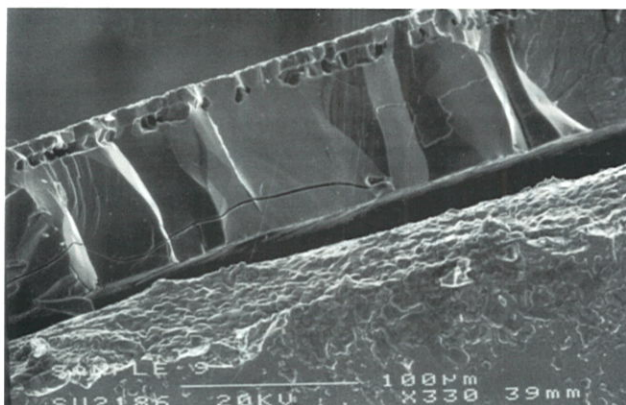
Model jest termomechaniczny, to znaczy wszystkie własności mechaniczne są funkcjami temperatury. Dla rozwiązania metodą elementów skończonych osiowosymetrycznego niestacjonarnego zagadnienia wymiany ciepła, odkształcenia, lepkiego poślizgu oraz pęknięcia zgorzeliny w różnych temperaturach wyko-



Rysunek 2. Fotografia powierzchni próbki po testowaniu ilustrująca dwa rodzaje uszkodzeń zgorzeliny stali niskostopowej podczas rozciągania. Odształcenie 2,0%, prędkość odształcenia 0,2 s<sup>-1</sup>, grubość zgorzeliny 140–180 mm; **a** – temperatura = 830°C; **b** – temperatura = 900°C.



Rysunek 3. Przekrój poprzeczny zgorzeliny stali niskostopowej powstałej po utlenianiu w temperaturze 783°C przez 1500 s.



Rysunek 4. Przekrój poprzeczny zgorzeliny stali niskostopowej powstałej po utlenianiu w temperaturze 1050°C przez 80 s.

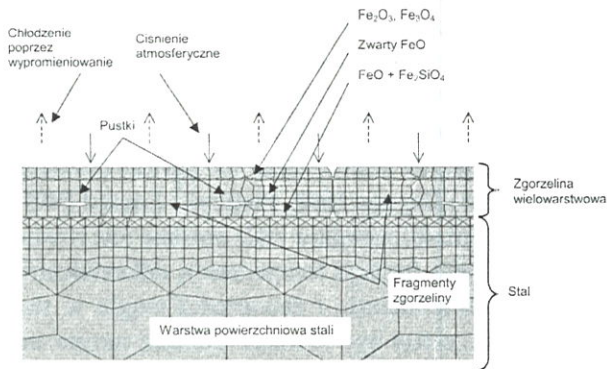
rzystano komercyjny pakiet MARC K7.2. Ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła oraz gęstość stali zostały wprowadzone na podstawie danych literaturowych podobnych do tych, które wykorzystywane są w modelach walcowania na gorąco (Bauccio 1993, Fletcher i Beynon 1996, Pietrzyk i Lenard 1991). Naprężenie uplastyczniające stali opisane jest równaniem Shidy jako funkcja temperatury, odształcenia, prędkości odształcenia i zawartości węgla w stali (Shida 1974), może być również opisane innym stosownym równaniem. Nagrzewanie indukcyjne modelowano zadając odpowiedni rozkład temperatury na powierzchni pomiarowej próbki oraz weryfikowano przy pomocy pirometru. Fragmenty zgorzeliny przed rozciąganiem były połączone razem w celu utworzenia spójnej warstwy zgorzelinowej. Długość poszczególnych fragmentów w modelu została dobrana tak, aby były one krótsze od najkrótszego z fragmentów zgorzeliny obserwowanych doświadczalnie, co pozwala na przewidywanie odstępów pomiędzy poszczególnymi pęknięciami. Każdy fragment składa się z izoparametrycznych, trójkątnych oraz czworokątnych elementów osiowo-symetrycznych. Przyjęto, że kontakt pomiędzy fragmentami zgorzeliny oraz pomiędzy zgorzeliną a powierzchnią metalu następował po zmniejszeniu odległości do 1 µm. Jak wynika z doświadczeń (Krzyżanowski i Beynon 1999a, Tan i in. 2001), zgorzelina na powierzchni stali niskostopowej podczas osiowo-symetrycznego rozciągania próbki ulega uszkodzeniu przeważnie na dwa sposoby, mianowicie: przez utworzenie poprzecznych pęknięć i późniejszego odłupywania się (rys. 2a) oraz poprzez poślizg wzdłuż powierzchni rozdziału całego odłamka zgorzeliny (rys. 2b). Zgorzelina składa się z kilku warstw zróżnicowanych morfologicznie i fazowo, co powoduje różnice w ich własnościach (rys. 3). W takiej wielowarstwowej zgorzelinie, do uszkodzeń powstałych poprzez tworzenie się poprzecznych pęknięć może dodatkowo dochodzić rozwarstwianie się wewnątrz samej zgorzeliny. Zazwyczaj rozwarstwienie obserwuje się pomiędzy tymi warstwami, w których występuje znacząca różnica wielkości ziaren (rys. 4). Większe pustki, pęcherze, przeważnie usytuowane pomiędzy warstwami zgorzeliny, dość często stanowią zarodki rozwarstwienia. W celu umożliwienia przewidywania tego zjawiska drogą analizy numerycznej, model zgorzeliny zawiera kilka warstw o różnych własnościach mechanicznych (rys. 5).

Zależność modułu Young'a od temperatury dla różnych składowych zgorzeliny stali oblicza się na podstawie równania (Morrel 1987, Schütze 1995):

$$E_{ox} = E_{ox}^o (1 + n(T - 25)) \quad (1)$$

gdzie:  $n = -4.7 \times 10^{-4}$ ;  $E_{ox}^o = 240$  GPa; (dla zgorzeliny





Rysunek 5. Część mikro modelu: zgorzelina wielowarstwowa.

żelaza);  $T$  – temperatura, °C.

$$E_{ox} = 151.504 \left( 1 - \frac{T - 300}{5476.66} \right), \text{ GPa}$$

dla FeO,

$$G_{ox}^o = 55.7 \text{ GPa}, T_m = 1643 \text{ K}, \nu_{ox} = 0.36$$

$$E_{ox} = 209.916 \left( 1 - \frac{T - 300}{9200} \right), \text{ GPa}$$

dla Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

$$G_{ox}^o = 88.2 \text{ GPa}, T_m = 1840 \text{ K}, \nu_{ox} = 0.19$$

Zależność modułu Young'a zgorzeliny od porowatości może być ujęta równaniem (Rice 1984, Birchall i in. 1981):

$$E = E_{ox}^o \exp(-bp) \quad (2)$$

gdzie:  $E_{ox}^o$  – moduł zgorzeliny stałej;  $p$  – porowatość;  $b \approx 3$ .

Porowatość obniża moduł Young'a, natomiast stosunkowo wielkie pory oddziałują jako pustki lub koncentratory naprężeń i w ten sposób powodują większą skłonność materiału do pęknięcia.

Jako kryterium do rozwoju poprzecznego pęknięcia na skutek obciążenia rozciągającego oddziałującego prostopadle do powierzchni pęknięcia przeważnie jest stosowane odkształcenie krytyczne (Schütze 1995)

$$\varepsilon_{kr} = \left( \frac{2\gamma(T)}{F^2 \pi E(T) c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

gdzie:  $\gamma$  jest powierzchniową energią pęknięcia,  $E$  jest modułem Young'a,  $F$  przybiera wartości 1.12, 1 i  $2/\pi$  odpowiednio dla karbu powierzchniowego o głębokości  $c$ , dla karbu ukrytego o szerokości  $2c$  oraz dla półkolistego karbu powierzchniowego mającego promień  $c$ . Niemniej jednak, jeżeli pęknięcie rozwija się w zgorzelinie zachowującej się sprężysto, lecz nieli-

niowo lub plastycznie, w modelu przewidywana jest możliwość obliczenia całki  $J$ , jako miary prędkości uwolnienia energii odkształcenia. Zarówno brak danych literaturowych dla zgorzeliny, dotyczących zależności wielkości całki  $J$  od długości powstałego pęknięcia, jak i obecność wyników doświadczalnych wskazujących na to, że powstawanie w zgorzelinie pęknięć poprzecznych jest istotnie procesem kruchej rozwoju pęknięcia, spowodowało przyjęcie w modelu zasad liniowo sprężystej mechaniki pęknięcia jako pierwszego przybliżenia.

Odkształcenie krytyczne, odniesione do pęknięcia na skutek obciążenia stycznego równoległego do powierzchni pęknięcia, przyjmowano jako dwukrotną wartość odpowiedniego rozciągającego odkształcenia krytycznego, które oddziałuje prostopadle, co pokrywa się z zasadami mechaniki pęknięcia. W warunkach adhezyjnego kontaktu zgorzeliny z metalem przewidywano lepki poślizg zgorzeliny wzdłuż powierzchni metalu w wyniku oddziaływania naprężenia ścinającego przenieszonego od powierzchni stali. Ten rodzaj poślizgu lepkiego jest analogiczny do poślizgu wzdłuż granic ziaren w procesie pełzania wysokotemperaturowego (Ridel 1982) i różni się od poślizgu oddzielnego fragmentu zgorzeliny w przypadku przekroczenia parametrów krytycznych.

Tablica 1 zawiera wartości współczynnika Poisson'a dla różnych warstw zgorzelinowych. Założono, że naprężenie uplastyczniające zgorzeliny w temperaturze 1050°C wynosiło około 130 MPa (Ranta i in. 1993).

Tablica 1. Współczynnik Poisson'a przyjmowany w modelu dla różnych warstw zgorzelinowych.

FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Liter.	Uwagi
	0,3		(Ranta i in. 1993)	Dane stosowane w modelach walcowania
0,36	0,29	0,19	(Robertson i Manning 1990)	Pojedynczy kryształ w temperaturze pokojowej

Inne własności termomechaniczne zgorzeliny oraz podstawowe założenia modelu przedstawione są w tablicach 2 i 3.

### 3. PRZYKŁAD OKREŚLENIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH UKŁADU ZGORZELINA-METAL

Rysunek 6 schematycznie ilustruje metodę pomiaru obciążeń rozdzielczych podczas uszkodzenia zgorzeliny w próbie na rozciąganie, natomiast rysunek 7 pokazuje stan końcowy zgorzeliny. Próbkę poddawaną jest utlenianiu bezpośrednio w urządzeniu do rozciągania. Jako utleniacz w testach stosowane było

Tablica 2. Własności termo-mechaniczne zgorzeliny oraz powierzchni rozdziału zgorzelina/metal stosowane przy modelowaniu.

Parametr	Funkcja	Literatura
Gęstość, kg/m <sup>3</sup>	$\rho = 5.7 \cdot 10^3$	(Ranta i in. 1993)
Ciepło właściwe, J/kg deg	$c_p = 674.959 + 0.297 \cdot T - 4.367 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$ dla $T \in 600 - 1100^\circ\text{C}$	(Ranta i in. 1993)
Współczynnik przewodzenia ciepła, W/mK	$\lambda = 1 + 7.833 \cdot 10^{-4} \cdot T$ dla $T \in 600 - 1200^\circ\text{C}$	(Ranta i in. 1993)
Współczynnik wymiany ciepła, W/m <sup>2</sup> K	$\alpha = 30000$	(Pietrzyk i Lenard 1991)
Współczynnik dyfuzji powierzchniowej razy wydajna grubość powierzchni, m <sup>3</sup> /s	$\delta_s D_s = \delta_s D_{0s} \exp\left(\frac{-Q_s}{RT}\right)$ $\delta_s D_{0s} = 1.10 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}; Q_s = 220 \text{ kJ/mol.}$	(Swinkels i Ashby 1981)
Współczynnik dyfuzji objętościowej, m <sup>2</sup> /s	$D_V = D_{0V} \exp\left(\frac{-Q_V}{RT}\right)$ $D_{0V} = 1.80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}; Q_V = 159 \text{ kJ/mol.}$	(Swinkels i Ashby 1981)
Współczynnik intensywności naprężenia, MN m <sup>-3/2</sup>	$K = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5$ dla $20 - 820^\circ\text{C}$ $a_0 = 1.425; a_1 = -8.897 \cdot 10^{-3};$ $a_2 = -8.21 \cdot 10^{-5}; a_3 = 3.176 \cdot 10^{-7};$ $a_4 = -5.455 \cdot 10^{-10}; a_5 = 3.437 \cdot 10^{-13}$	(Hancock i Nicholls 1988)
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej, $\times 10^{-6} \text{ deg}^{-1}$	$\alpha_{ox} = 15.0 \text{ (FeO)}; 12.0 \text{ (Fe}_3\text{O}_4); 13.0 \text{ (Fe}_2\text{O}_3)$	(Robertson i Manning 1990)

Tablica 3. Podstawowe założenia modelu zgorzeliny.

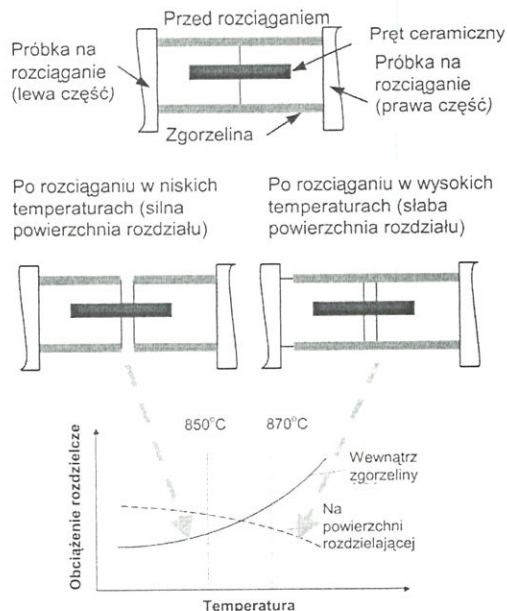
Założenie	Równanie	Literatura
Prędkość poślizgu lepkiego zgorzeliny kontrolowana jest przez dyfuzję atomów metali ukierunkowaną naprężeniem wokół nieregularności w obszarze powierzchni rozdziału zgorzelina/metal	$v_{rel} = \frac{1}{\eta} \tau$	
Pełzanie dyslokacyjne może towarzyszyć dyfuzyjnemu przemieszczeniu się atomów w obszarze nieregularności przy powierzchni rozdziału zgorzelina/metal	$v_{rel} = \frac{1}{\eta}  \tau ^{k-1} \tau$	(Riedel 1982) (Swinkels i Ashby 1981)
Współczynnik lepkości uzależniony jest od temperatury, objętości atomowej, współczynników dyfuzji oraz chropowatości powierzchni rozdziału zgorzelina/metal	$\eta = \frac{\bar{k} \bar{T} p^2}{8\Omega \left( \delta D_s + \lambda \frac{D_V}{4\pi} \right)}$	

powietrze, ale istnieje także możliwość zastosowania atmosfery kontrolowanej. Podczas nagrzewania i utleniania części próbki (rysunek 6) poddawane są lekkiemu obciążeniu ściskającemu w celu utrzymania spójnej warstwy zgorzelinowej na cylindrycznej bocznej powierzchni próbki oraz niedopuszczenia do utlenienia pomiędzy powierzchniami styku. W zakresie niskich temperatur, w którym adhezyjne własności zgorzeliny są stosunkowo większe, mierzone są obciążenia rozdzielcze wewnątrz samej zgorzeliny podczas poprzecznego pęknięcia. Natomiast, w temperaturach wyższych istnieje możliwość pomiaru obciążenia rozdzielczego styczego, które mierzone jest pomiędzy zgorzeliną a powierzchnią metalu lub, jeżeli występuje rozwarstwienie zgorzeliny, w obszarze najsłabszej powierzchni rozdziału. W celu wyeliminowania efektów nie związanych ze zgorzeliną, występujących

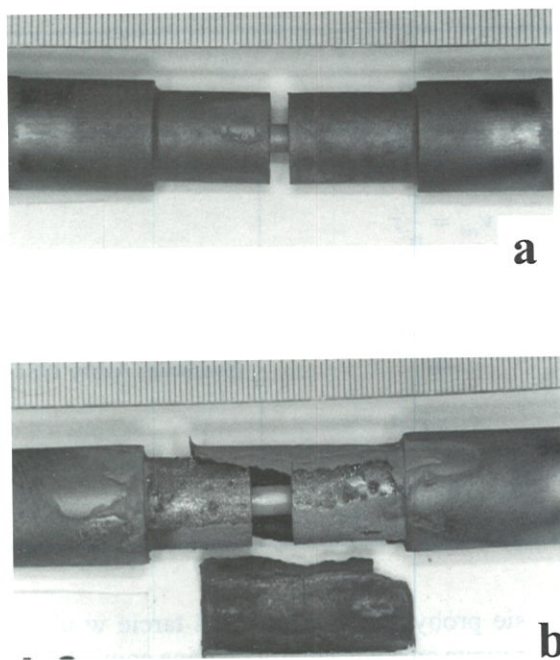
w czasie próby, jak na przykład tarcie w układzie pomiarowym oraz wiązanie adhezyjne pomiędzy przylegającymi podczas nagrzewania częściami próbki, prowadzi się pomiar odpowiednich obciążeń przy tych samych parametrach, ale bez utleniania. Obciążenia te odejmowane są od obciążeń uzyskanych w próbie z utlenianiem.

Na drodze doświadczalnej wykazano, że dla stali niskostopowej przejście od rodzaju uszkodzenia zgorzeliny przez utworzenie poprzecznego pęknięcia do uszkodzenia zgorzeliny przez poślizg odbywa się w zakresie temperatur 850–870°C (Krzyżanowski i Beynon 1999a). Przedstawiono również, że stan chemiczny stali, jako materiału podłoża, może w znacznym stopniu zmienić ten zakres (Tan i in. 2001). Wskazuje to na celowość określenia tego zakresu dla wybranego gatunku stali w celu prawidłowego modelowania





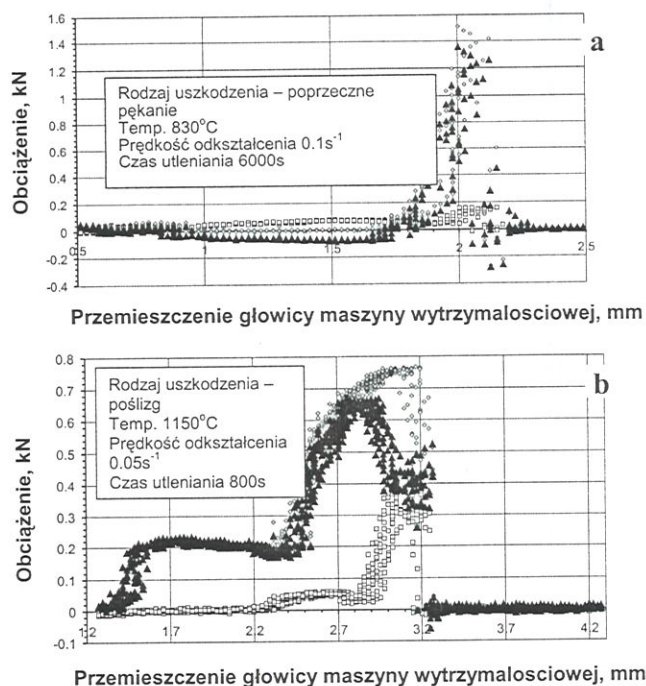
Rysunek 6. Schemat pomiaru obciążeń rozdzielczych podczas uszkodzenia zgorzeliny w próbce na rozciąganie.



Rysunek 7. Dwa rodzaje uszkodzeń zgorzeliny stali niskostopowej podczas pomiaru obciążeń rozdzielczych: a) formowanie pęknięcia poprzecznego; b) poślizg pomiędzy zgorzeliną a powierzchnią metalu.

zachowania się zgorzeliny podczas odkształcenia.

Rysunek 8 ilustruje poziom obciążeń doprowadzających do uszkodzenia zgorzeliny. Mierzone obciążenia są przeliczane na naprężenia rozdzielcze w celu wprowadzenia ich do modelu. Obciążenia rozdzielcze występują jako parametry krytyczne niezbędne dla numerycznego scharakteryzowania uszkodzenia zgorzeliny podczas odkształcenia, są one również silnie uzależnione od składu chemicznego podłoża stali. Wartości tych obciążeń są stosunkowo małe, co zna-

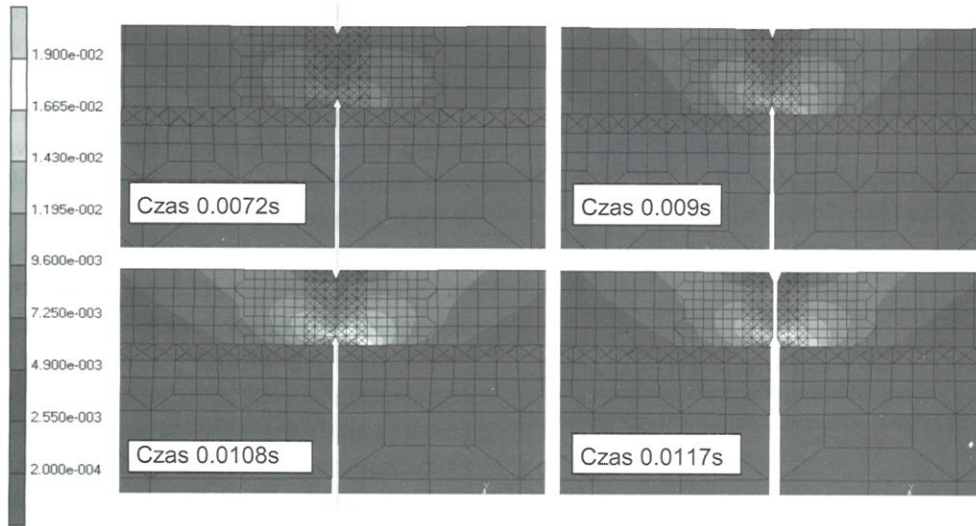


Rysunek 8. Obciążenia zarejestrowane podczas różnych rodzajów uszkodzeń zgorzeliny: pęknięcie poprzeczne (a) poślizg wzdłuż powierzchni rozdzielczej (b);  $\diamond$  – z utlenianiem;  $\square$  – bez utleniania;  $\blacktriangle$  – odejmowanie  $\square$  od  $\diamond$ .

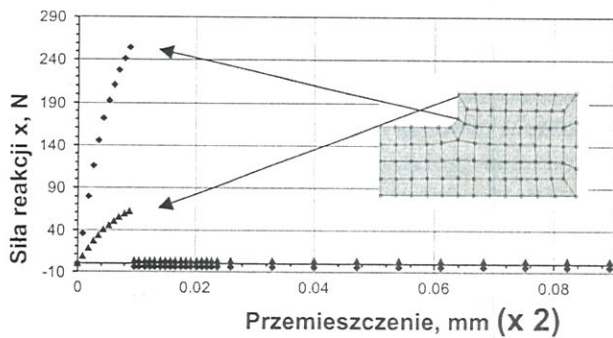
cząco utrudnia ich pomiar. Kolejne utrudnienie związane jest z tym, że pęknięcie zgorzeliny powstaje w miejscu na krawędzi próbki, gdzie występują lokalne niejednorodności temperatury, odkształceń i naprężeń. Poza tym, punkty rejestrowania obciążeń znajdują się w obszarze główek próbki, które oddalone są od miejsca powstawania pęknięcia. Zastosowanie modelowania metodą elementów skończonych do numerycznej analizy danych pomiarowych w znacznym stopniu podwyższa dokładność analizy.

Przykład numerycznej analizy w zakresie niskich temperatur, w których dochodzi do poprzecznego pęknięcia zgorzeliny ilustruje rysunek 9. Przedstawia on rozkład odkształceń wokół obszaru powstawania pęknięcia. Obciążenie, przewidywane jako siła reakcji w różnych punktach głowki próbki, pokazane jest na rysunku 10. Rozkład podłużnej składowej naprężenia rozciągającego wokół pęknięcia wskazuje na typowo kruchy charakter pęknięcia. Siła reakcji, pokazana dla dwóch punktów głowki próbki, uzależniona jest od obciążeń rozdzielczych w obszarze pęknięcia. Wykazuje ona gwałtowny wzrost, po którym następuje nagły spadek do zera w momencie powstania pęknięcia. Widoczne są różnice zaobserwowane pomiędzy obciążeniami przewidywanymi w różnych miejscach głowki, które świadczą o ważności prawidłowego określenia miejsca styku próbki w uchwytach podczas pomiaru.

Rysunki 11 i 12 ilustrują odpowiednio rozkład odkształceń oraz siłę reakcji podobnie do przedstawio-



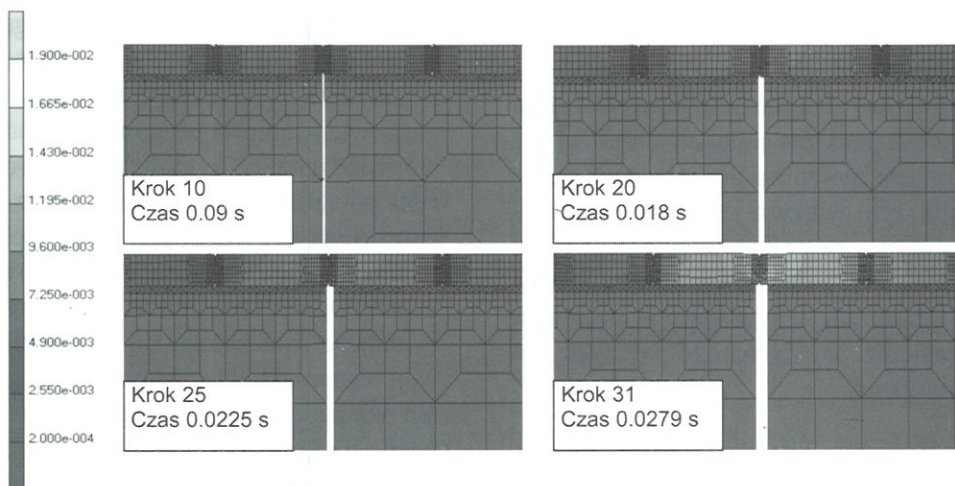
Rysunek 9. Rozkład podłużnej składowej odkształcenia ( $\epsilon_x$ ) w czasie powstawania pęknięcia poprzecznego podczas próby rozciągania na gorąco przewidywany dla temperatury  $800^\circ\text{C}$ , prędkości odkształcenia  $0,2 \text{ s}^{-1}$  oraz grubości zgorzeli  $100 \mu\text{m}$ .



Rysunek 10. Siła reakcji przewidywana w dwóch punktach główki próbki w czasie powstawania w zgorzelinie pęknięcia poprzecznego podczas próby rozciągania na gorąco dla temperatury  $800^\circ\text{C}$ , prędkości odkształcenia  $0,2 \text{ s}^{-1}$  oraz grubości zgorzeli  $100 \mu\text{m}$ .

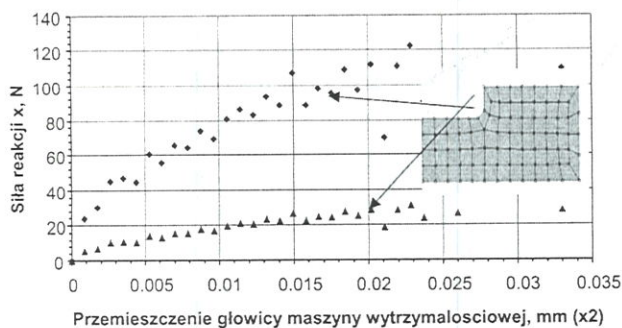
nych na poprzednich rysunkach z tym, że są wyznaczone dla temperatury  $1050^\circ\text{C}$ , w której uszkodzenie zgorzeli odbywa się przez poślizg. W tym przypadku rejestrowane są styczne obciążenia rozdzielcze. Siła reakcji wzrasta nie tak gwałtownie, jak miało to miejsce w niższej temperaturze (rys. 10), oraz spada powoli do momentu zerwania, wskazując na oznaki lepszego pęknięcia zgorzeli w wyższych temperaturach.

Dopasowywanie przewidywanych oraz zmierzonych obciążeń daje możliwość określenia obciążeń rozdzielczych wewnątrz samej zgorzeli, lub w obszarze powierzchni rozdziału zgorzelina/metal, które są później wprowadzane do modelu. Metoda została sprawdzona dla zgorzeli stali niskostopowej. Jako przykład, na rysunku 13 przedstawione są zmierzone oraz przewidziane dla tych samych parametrów dane dotyczące zgorzeli stali niskostopowej zawierającej więcej krzemu, co umożliwi powstanie poprzecz-

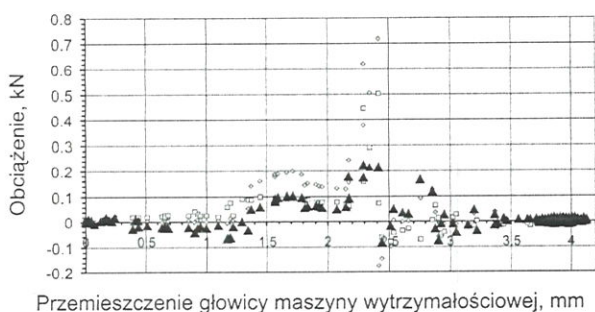


Rysunek 11. Rozkład podłużnej składowej odkształcenia  $\epsilon_x$  w czasie poślizgu podczas próby rozciągania na gorąco przewidywany dla temperatury  $1150^\circ\text{C}$ , prędkości odkształcenia  $0,2 \text{ s}^{-1}$  oraz grubości zgorzeli  $100 \mu\text{m}$ .

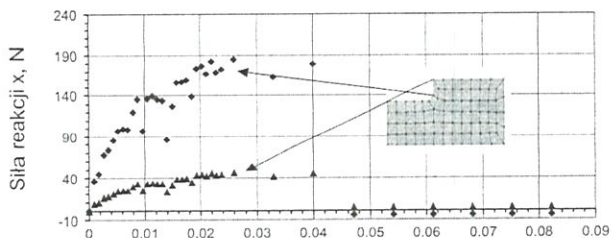




Rysunek 12. Siła reakcji w czasie uszkodzenia zgorzeliny przez poślizg podczas próby rozciągania na gorąco przewidziana dla temperatury 1150°C, prędkości odkształcenia 0,2 s<sup>-1</sup> oraz grubości zgorzeliny 100 μm.



Przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej, mm



Przemieszczenie głowicy maszyny wytrzymałościowej, mm (x 2)

Rysunek 13. Zmierzona (a) oraz przewidywana (b) w czasie powstania pęknięcia poprzecznego siła reakcji podczas próby rozciągania na gorąco w temperaturze 975°C, przy prędkości odkształcenia 0,2 s<sup>-1</sup> oraz czasie utleniania 800 s.

nego pęknięcia w temperaturze 975°C (zwiększona zawartość Si podwyższa adhezję zgorzeliny w wyższych temperaturach). Można tu zaobserwować dobrą zgodność pomiędzy danymi pomiarowymi oraz przewidywanymi dla punktów położonych bliżej osi próbki. Im grubsza jest zgorzelina poddawana jest próbie na rozciąganie, tym większa jest różnica pomiędzy danymi pomiarowymi prób z utlenianiem i bez utleniania. Innymi słowy, wzrost czasu utleniania podwyższa precyzję pomiaru, a tym samym poprawia dokładność określenia obciążeń rozdzielczych dla układu zgorzelina/metal.

#### 4. ZASTOSOWANIE

Jakość powierzchni staje się obecnie coraz ważniejszą własnością wyrobu. Cały szereg czynników

ma wpływ na jakość powierzchni, z których wiele jest związanych ze zgorzeliną. Jakość powierzchni jest również czynnikiem krytycznym dla nowoczesnych trendów w walcownictwie, jak na przykład wymiana pasma na gorąco, gdzie ważna jest powierzchnia gorąco walcowanego wsadu. Także produkcja wyrobów w wysokich temperaturach o kształcie zbliżonym do gotowego, charakteryzuje się również dużą, w stosunku do grubości, powierzchnią poddawaną utlenianiu. Własności zgorzeliny, technologie jej usuwania, również zgorzelina wtórna poddawana walcowaniu, są zagadnieniami zasługującymi na szczególną uwagę. Powstawanie zgorzeliny na walcach z późniejszym jej złuszczeniem się również obniża jakość wyrobu. Zjawisko to, dość znane w procesach walcowania aluminium, w znacznym stopniu uzależnione jest od wydajności powłoki na walcach aluminiowych. Poznanie procesów rozwoju uszkodzeń podczas walcowania, zarówno na powierzchni wsadu, jak i walców, włączając ich kontrolę w systemie „on-line”, również mogą przynieść korzyści z dokładniejszego numerycznego opisu zgorzeliny.

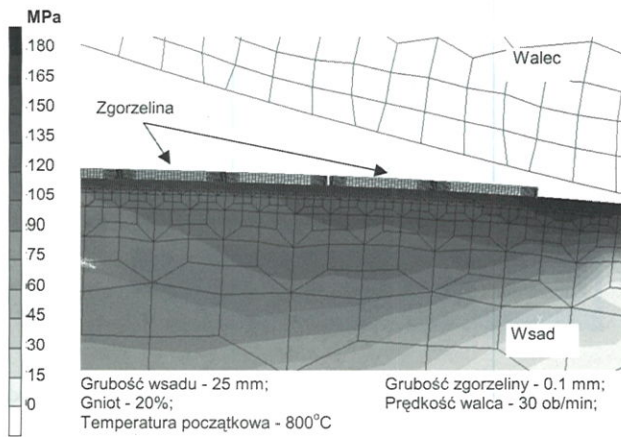
Poniżej przedstawiono tylko kilka przykładów z wielu innych możliwych zastosowań opracowanego modelu matematycznego. Są pośród nich, analiza uszkodzenia zgorzeliny wtórnej podczas walcowania na gorąco z położeniem szczególnej uwagi na obszar wejścia materiału do kotłowni walcowniczej (Krzyżanowski i in. 2000) oraz analiza zjawisk związanych z hydraulicznym i mechanicznym usunięciem zgorzeliny po walcowaniu (Krzyżanowski i Beynon 2000b).

#### 4.1. Analiza zachowania się zgorzeliny podczas walcowania na gorąco: jakość powierzchni

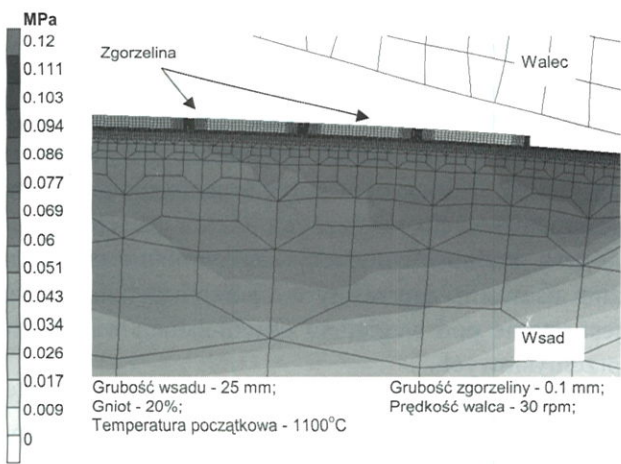
Temperatura wsadu przed wejściem do walców jest prawdopodobnie najbardziej krytycznym czynnikiem wpływającym na zachowanie się zgorzeliny. Oprócz bezpośredniego wpływu na wielkość lepkiego poślizgu stycznego, adhezyjne własności zgorzeliny, energii powierzchniową pęknięcia oraz moduł Younga, które wprowadzane są do modelu oraz wchodzi do kryteriów pęknięcia poprzecznego, a także odłupywania się zgorzeliny, oczywisty jest także wpływ temperatury na morfologię zgorzeliny oraz na powstawanie w niej pustek. Opracowany model matematyczny pozwala na symulacje zachowania się zgorzeliny wielowarstwowej. Niemniej jednak, w celu prostego zaprezentowania działania modelu, w jego części mikro dla walcowania na gorąco przyjęto zgorzelinę o grubości 100 μm, jednorodną z niewielką porowatością.

Wyniki modelowania wskazują na to, że w przypadku stosunkowo niskiej temperatury wsadu, w za-

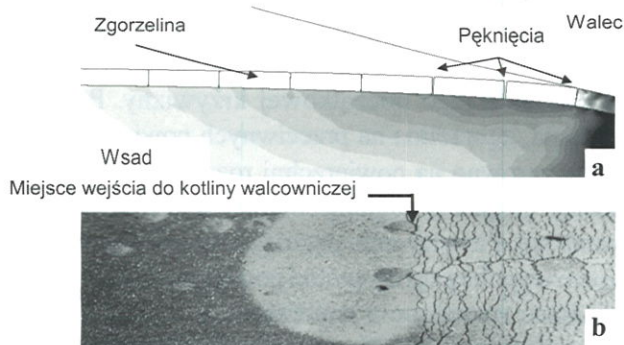




Rysunek 14. Rozkład składowej  $\sigma_x$  naprężenia w warstwie powierzchniowej wsadu przewidywany dla temperatury początkowej 800°C, ilustrujący powstawanie pęknięcia poprzecznego w zgorzelinie przed wejściem wsadu do kotliny walcowniczej.



Rysunek 15. Rozkład składowej  $\sigma_x$  naprężenia w warstwie powierzchniowej wsadu przewidywany dla temperatury początkowej 1100°C, ilustrujący zachowanie ciągłości zgorzeliny w obszarze wejścia wsadu do kotliny walcowniczej.



Rysunek 16. Pęknięcia powstające w zgorzelinie w momencie wejścia do kotliny walcowniczej. (a) dane z modelowania; (b) obraz zgorzeliny uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego.

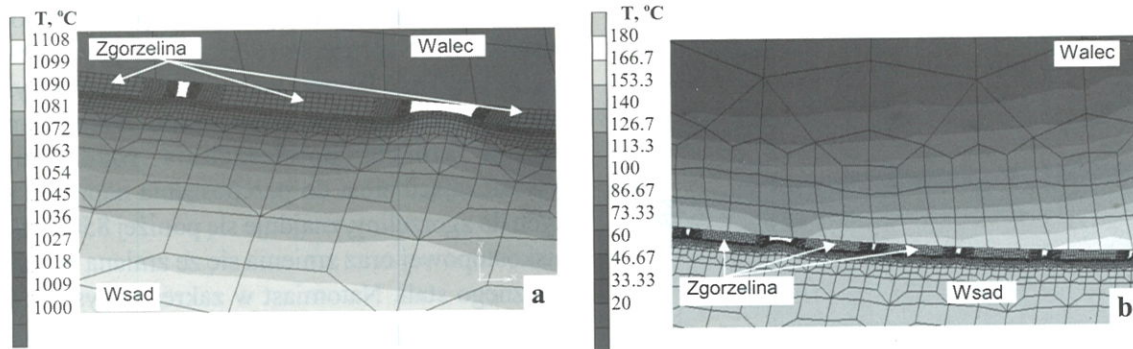
kresie zgorzeliny kruchej oraz mocnej powierzchni rozdziału zgorzelina/metal, podłużne odkształcenie rozciągające w obszarze warstwy powierzchniowej tuż przed kotliną walcowniczą może doprowadzić do po-

wstania poprzecznych pęknięć, co przedstawiono na rysunku 14. Naprężenie rozciągające powstaje dlatego, że prędkość liniowa walca przewyższa w tym obszarze prędkość powierzchni wsadu. Zakres temperatur, w którym powierzchnia rozdziału jest wystarczająco silna do przenoszenia naprężeń stycznych do zgorzeliny, znajduje się poniżej 850°C dla stali niskostopowej oraz zmienia się ze zmianą składu chemicznego stali. Natomiast w zakresie wysokich temperatur poślizg zgorzeliny może odgrywać znaczącą rolę w procesie relaksacji przenoszonych naprężeń. Chociaż poślizg lepki zachodzi łatwiej w wysokiej temperaturze, bardziej prawdopodobne jest to, że naprężenia styczne w obszarze powierzchni rozdziału zgorzelina/metal doprowadzają do odłupywania się zgorzeliny. Poziom naprężeń podłużnych w warstwie powierzchniowej wsadu jest mniejszy w temperaturze wysokiej niż w zakresie temperatur niskich. Niemniej jednak, jak widać na rysunkach 14 i 15, relaksacja naprężeń w zgorzelinie w odniesieniu do powierzchni metalu, zauważalna jest w obu przypadkach. Różnica polega na tym, że w wysokiej temperaturze nie dochodzi do powstawania w zgorzelinie pęknięć poprzecznych, więc zgorzelina dociera do kotliny walcowniczej w stanie nie popęknanym.

Rysunek 16 (b) przedstawia fotografię powierzchni próbki ze stali niskostopowej poddanej walcowaniu na gorąco w ten sposób, że proces został przerwany w połowie długości próbki, umożliwiając późniejszą obserwację stanu powierzchni zgorzeliny w trzech obszarach, mianowicie: przed, podczas oraz po walcowaniu. Tego typu testy wykorzystywano do weryfikacji modelu matematycznego.

Rysunek 17 ilustruje zmiany rozkładu temperatury w obszarze kotliny walcowniczej na styku wsadu z walcem, które są spowodowane popękaniem zgorzeliny. Efekt ten mógł być jeszcze większy, gdyby doszło do bezpośredniego kontaktu pomiędzy względnie zimną powierzchnią walca a gorącym metalem wsadu, wtłaczanym poprzez poszerzone pęknięcia. Jak widać, uszkodzenie zgorzeliny wtórnej w ten sposób oddziałuje na przebieg wymiany ciepła. Ma to także znaczący wpływ na procesy tarcia w tym obszarze, zakładając możliwość bezpośredniego kontaktu pomiędzy wsadem a walcem oraz biorąc pod uwagę możliwe odłupywanie się zgorzeliny. Przykład przewidywania stanu zgorzeliny po wyjściu z kotliny walcowniczej przedstawiony jest na rysunku 18 (a). Można z tego wyciągnąć dwa wnioski. Pierwszy, że zgorzelina po walcowaniu nie zawsze do końca przylega do metalu. Drugim wnioskiem jest to, że powierzchnia metalu nie jest gładka w obszarach lokalnego wtłaczania metalu, które powstają w zgorzelinie w miejscach wcześniejszych pęknięć. To drugie zjawisko prowadzi do obniżenia jakości wyrobu po wal-





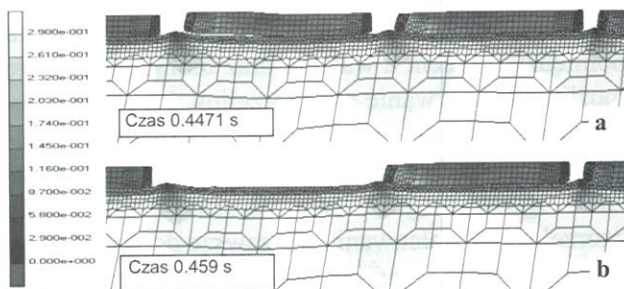
Rysunek 17. Rozkład temperatury w obszarze popękanej zgorzeliny w kotlinie walcowniczej przewidywany dla warstwy powierzchniowej wsadu (a) oraz walca (b).

cowaniu, natomiast pierwsze ma wpływ na proces usuwania zgorzeliny wtórnej, który będzie przedyskutowany w następnym rozdziale.

## 4.2. Analiza procesów usuwania zgorzeliny

### 4.2.1. Hydrauliczne usuwanie zgorzeliny

Stan wsadu po walcowaniu, przedstawiony na rysunku 18, został wykorzystany jako stan początkowy dla symulacji procesu hydraulicznego usuwania zgorzeliny. Zostało to osiągnięte przez wprowadzenie do modelu niestacjonarnych warunków brzegowych reprezentujących natrysk wodny. W obszarze zgorzeliny, znajdującej się w czasie oddziaływania natrysku wodnego w warunkach dużych gradientów temperatur, pojawiają się znaczne naprężenia cieplne, wynikające z różnic we współczynnikach rozszerzalności cieplnej stali i zgorzeliny. Rysunek 18b reprezentuje pierwszą fazę usuwania zgorzeliny, gdzie widać, że fragment częściowo oddzielony od powierzchni metalu podczas walcowania został oderwany w pierwszej kolejności. Oddzielenie pozostałych fragmentów zgorzeliny odbywało się stopniowo, w zależności od stopnia przylegania do metalowej powierzchni. Podając analizie siły reakcji przewidziane drogą modelowania procesu usuwania zgorzeliny po walcowaniu,



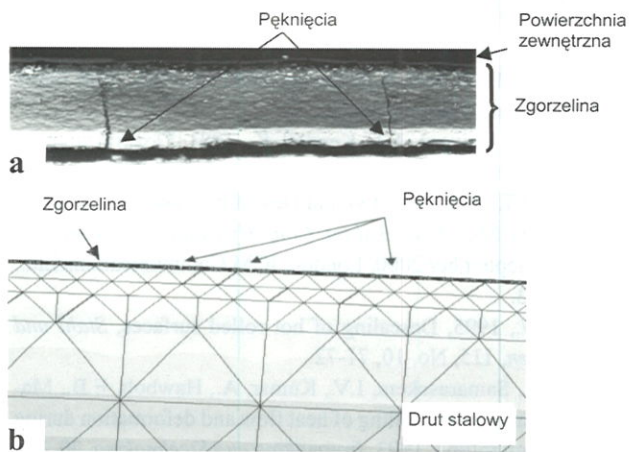
Rysunek 18. Odlupywanie się w pierwszej kolejności zgorzeliny częściowo oddzielonej po walcowaniu na gorąco podczas jej hydraulicznego usuwania. Przedstawiono przewidywany rozkład odkształcenia zastępczego.

możliwa jest ocena termicznego oraz mechanicznego wpływu natrysku wodnego zbijacza zgorzeliny.

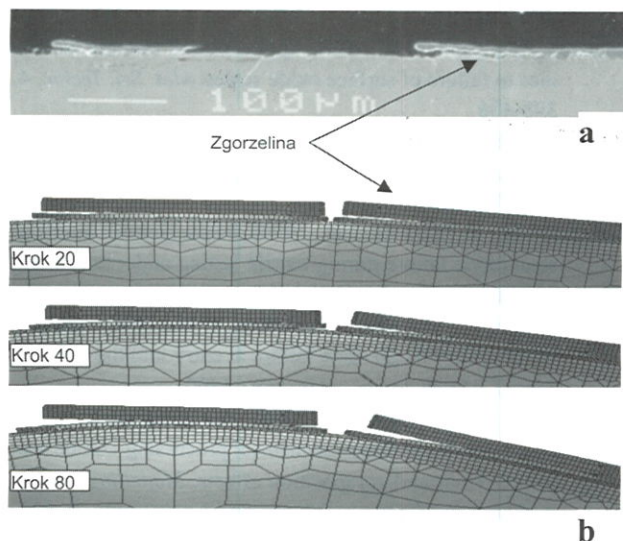
### 4.2.2. Mechaniczne usuwanie zgorzeliny

Powierzchnia zwoju drutu stalowego produkowanego drogą walcowania na gorąco zawsze utlenia się podczas tego procesu. Powstała zgorzelina musi być usunięta przed procesem ciągnięcia. Powstawanie zgorzeliny w znacznym stopniu uzależnione jest od parametrów technologicznych, takich jak temperatura oraz prędkość chłodzenia. Zrozumienie mechanizmu usuwania zgorzeliny w operacji zwijania drutu jest istotne pod względem optymalizacji warunków przemysłowych.

W celu zbadania mechanizmu powstania pęknięć, rozwarstwienia oraz odlupywania się zgorzeliny stosowano próbę na zginanie połączoną z analizą numeryczną prowadzoną za pomocą tego samego modelu mikro zgorzeliny, który był stosowany do analizy walcowania na gorąco oraz hydraulicznego usuwania zgorzeliny. Próba na zginanie przeprowadzana była w sposób następujący: jeden z końców drutu, poddawany próbie, mocowano w szczękach imadła, natomiast drugi koniec poddawano obciążeniu w celu zwiększenia jego początkowej krzywizny. Podczas zginania, zgorzelina na przeciwnych powierzchniach drutu, zarówno na powierzchni rozciąganej jak i ścisanej, ulegała postępującemu pękaniu oraz odlupywaniu się. Powstawanie pęknięć poprzecznych w obszarze wypukłej strony próbki powodowało naprężenia ścinające sprzężone z naprężeniami rozciągającymi zgorzeliny (rys. 19). Naprężenia te osiągały wartości maksymalne blisko krawędzi powstałych pęknięć. Relaksacja naprężeń ścinających, wobec braku w niskiej temperaturze wyraźnego poślizgu lepkiego, odbywała się na skutek pęknięcia wzdłuż powierzchni rozdziału oraz odlupywania się fragmentu zgorzeliny w momencie osiągnięcia odkształcenia krytycznego. Jak wynika z rysunku 20, czasem bardziej ciągliwa warstwa wewnętrzna zgorzeliny wielowarstwowej po zgi-



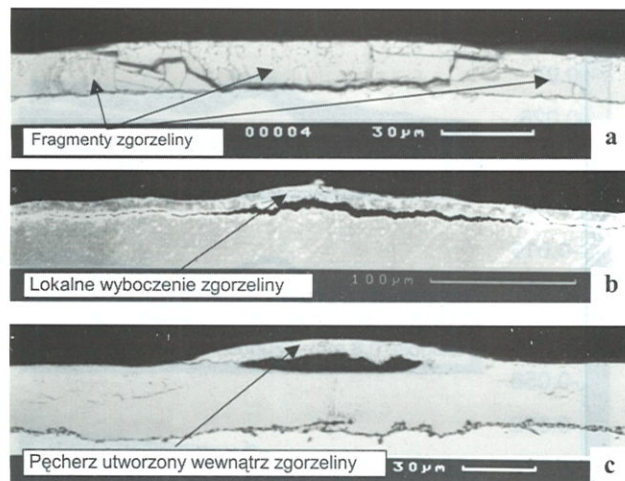
Rysunek 19. Poprzeczne pęknięcia powstałe w zgorzelinie drutu stalowego po stronie wypukłej podczas próby zginania; a) obraz przekroju poprzecznego uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego, b) dane z modelowania.



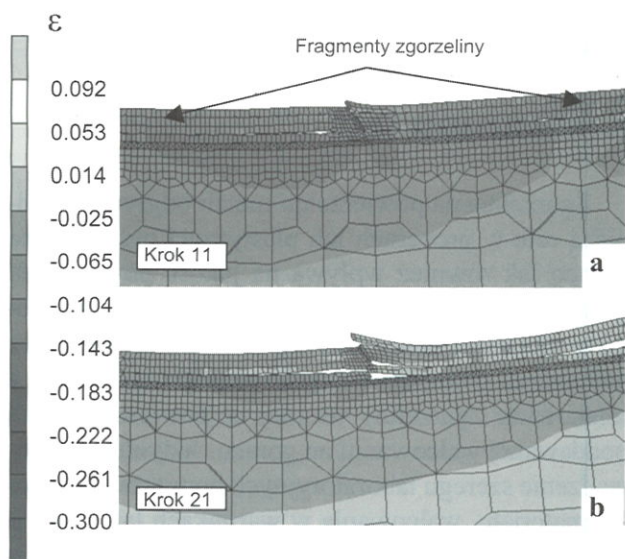
Rysunek 20. Rozwarstwienie wewnątrz wielowarstwowej zgorzeliny oraz odłupywanie warstw zewnętrznych po stronie wypukłej drutu stalowego; a) obraz przekroju porzecznego drutu ze stali niskostopowej, b) dane z modelowania próby zginania dla różnych kroków czasowych.

naniu może dalej przylegać do powierzchni metalu, podczas gdy górne kruche warstwy ulegają odłupywaniu się na skutek rozwarstwienia wewnątrz zgorzeliny.

Mechanizm odłupywania się zgorzeliny na przeciwnej, wklęsłej powierzchni drutu stalowego, gdzie powstają podłużne naprężenia ściskające, jest inny. Początek odłupywania się na skutek ściskania obserwowano w obszarach, w których powstałe pęknięcia poprzeczne tworzyły klin pomiędzy fragmentami zgorzeliny a powierzchnią metalu oraz w których utworzone były lokalne obszary dekohezji takie, jak wyboczenia lub pęcherze kształtujące grzbiety w zgorzelinie (rys. 21). Odłupywanie się zgorzeliny na skutek oddziaływania naprężeń ściskających odbywało



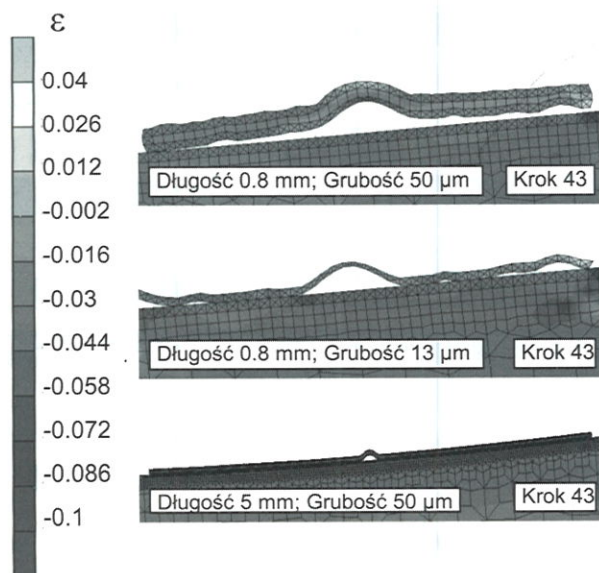
Rysunek 21. Przekrój poprzeczny zgorzeliny ilustrujący źródła dekohezji po stronie poddawanej ściszczeniu podłużnemu podczas zginania drutu stalowego; a) pęknięcia o kształcie klina, b) lokalne wyboczenie, c) pęcherz.



Rysunek 22. Rozkład składowej podłużnej odkształcenia zastępczego przewidywany dla różnych kroków czasowych po stronie wklęsłej drutu zawierającego wielowarstwową zgorzelinę poddanego próbie zginania. Odłupywanie się zgorzeliny według mechanizmu „klinowego”.

się w przypadku powstawania poprzecznych pęknięć o kształcie klina lub lokalnych wyboczeń przekraczających wymiary krytyczne (rys. 22 i 23). Przeprowadzone obliczenia z użyciem opracowanego modelu wskazują na to, że w celu ułatwienia procesu mechanicznego usuwania zgorzeliny, zarówno na wypukłej jak i na wklęsłej powierzchni drutu stalowego, korzystne jest skrócenie długości jak i zwiększenie grubości fragmentów zgorzeliny. Niemniej jednak, w praktyce przemysłowej niezależna zmiana tych parametrów nie jest łatwa.





Rysunek 23. Przewidywanie odlupywania się fragmentu zgorzeliny po stronie wypukłej drutu stalowego podczas próby zginania dla różnych długości i grubości zgorzeliny. Łatwiejsze odlupywanie się krótszego oraz grubszego fragmentu zgorzeliny zawierającego pęcherz.

## 5. PODSUMOWANIE

Zgorzelina na powierzchni metali odgrywa zasadniczą rolę w procesach ich plastycznej przeróbki na gorąco jak również wpływa na jakość powierzchni gotowego wyrobu po przeróbce. Badania przedstawione w niniejszej pracy dotyczą zachowania jednego z najbardziej skomplikowanych rodzajów zgorzeliny, a mianowicie zgorzeliny wtórnej na powierzchni stali poddawanej walcowaniu na gorąco. Jedynie przeprowadzenie szeregu laboratoryjnych pomiarów własności materiału, walcowania w warunkach laboratoryjnych, badań mikrostruktury połączonych, co jest szczególnie istotne, z dokładną analizą metodą elementów skończonych, umożliwiło opracowanie modelu matematycznego zachowania się zgorzeliny w warunkach odkształcenia na gorąco opierającego się o podstawy fizyczne oraz niezbędne dane pomiarowe. Model ten został zweryfikowany zarówno w warunkach podobnych, do których był przeznaczony, czyli walcowania na gorąco, jak również w warunkach hydraulicznego oraz mechanicznego usuwania zgorzeliny. Weryfikacja potwierdziła prawidłowość fizycznych założeń modelu oraz wykazała jego integralność. Przeprowadzona analiza jest również przykładem, jak wybrana kombinacja różnych technik badawczych może pozwolić na scharakteryzowanie materiału w warunkach, w których osobne zastosowanie poszczególnych metod nie daje zadowalających wyników.

## LITERATURA

- Bauccio, M., 1993, Metals Reference Book, 2nd ed., *ASM International*, Materials Park.
- Birchall, J.D., Howard, A.J., Kendall, K., 1981, Flexural strength and porosity of cements, *Nature*, 289, 388-390.
- Blazevic, D.T., 2000, Newton and Descaling - Data and Conclusions, *Mat. Konf. 3rd Int. Conf. Hydraulic Descaling*, 14-15 September 2000, London, IOM Communications Ltd., 3-13.
- Buchele, W., 1995, Descaling of hot rolled surfaces, *Stahl und Eisen*, 115, No. 10, 71-72.
- Chen, W.C., Samarasekera, I.V., Kumar, A., Hawbolt, E.B., Mathematical modelling of heat flow and deformation during rough rolling, 1993, *Ironmaking and Steelmaking*, 20, No. 2, 113-125.
- Fletcher, J. D., Beynon, J.H., 1996, Relating the small scale thermo-tribo mechanics in hot strip rolling to the global deformation behaviour, *Mat Konf. 2nd Int. Conf. Modelling of Metal Rolling Processes*, ed., Beynon, J.H., Ingham, P., Teichert, H., Waterson, K., The Institute of Materials, London, 202-212.
- Hancock, P., Nicholls, J.R., 1988, Application of fracture mechanics to failure of surface oxide scales, *Mat. Sci. Techn.*, 4, 398-406.
- Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 1999a, The tensile failure of mild steel oxides under hot rolling conditions, *Steel Research*, 70, No. 1/99, 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., 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., 2000a, 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., 2000b, Effect of oxide scale failure in hot steel rolling on subsequent hydraulic descaling: numerical simulation, *Mat. Konf. 3rd Int. Conf. Hydraulic Descaling*, 14-15 September 2000, London, IOM Communications Ltd., 77-86.
- Lees, D.G., 1987, On the reasons for the effects of dispersions of stable oxides and additions of reactive elements on the adhesion and growth mechanisms of chromia and alumina scales - the sulfur effect, *Oxid. Met.*, 27, 75-81.
- 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, *Proc. 2nd Int. Conf. On Modelling of Metal Rolling Processes*, J. H. Beynon, P. Ingham, H. Teichert and K. Waterson, eds., The Institute of Materials, London, UK, 192-206.
- Morrel, R., 1987, Handbook of properties of technical and engineering ceramics, London, HMSO.
- Nakamura, T., Sato, M., 1994, Descalability on reheated steel slabs at high temperature, *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 80, No. 3, 237-242.
- Pieraggi, B., Rapp, R., 1994, Interfacial scaling reactions and reactive element effect, *Materials at High Temp.*, 12, 229-235.

- Pietrzyk, M., Lenard, J.G., 1991, Thermal-Mechanical Modelling of the Flat Rolling Process, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Ranta, H., Larkiola, J., Korhonen, A.S., Nikula, A., 1993, A study of scale-effects during accelerated cooling, *Proc. 1st Int. Conf. on 'Modelling of metal rolling processes'*, London, 1993, The Institute of Materials, 638-649.
- Rice R. W., 1984, Pores as Fracture Origins in Ceramics. *J. Mater. Sci.*, 19, 895-914.
- Ridel, H., 1982, Deformation and cracking of thin second-phase layers on deforming metals at elevated temperature, *Metal Science*, 1982, 16, 569-574.
- Robertson, J., Manning, M.I., 1990, Limits to adherence of oxide scales, *Mat.Sci.Technol.*, 6, 81-91.
- Schütze, M., 1995, Mechanical properties of oxide scales, *Oxid. Met.*, 44, No. 1-2, 29-61.
- Shida, S., 1974, Effect of Carbon Content, Temperature and Strain on Compressive Flow Stress of Carbon Steels, *Hitachi Res. Lab. Report*, Tokyo.
- Strawbridge, A., Hou, P., 1994, The role of reactive elements in oxide scale adhesion, *Materials at High Temp.*, 12, 177-181.
- Swinkels, F.B., Ashby, M.F., 1981, A second report on sintering diagrams, *Acta Metall.*, 29, 259-281.
- Tan, K.S., Krzyżanowski, M., Beynon, J.H., 2001, Effect of steel composition on failure of oxide scales in tension under hot rolling conditions, *Steel Research*, 72, No. 7, 250-258.
- Wada, T., Oshimi, M., Ueda, M., 1991, Temperature drop of steel by hydraulic descaling for a hot strip rolling mill, *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, 77, No. 9, 1458-1464.
- Whittle, D.P., Stringer, J., 1980, Improvements in high temperature oxidation resistance by additions of reactive elements or oxide dispersions, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A295, 309-315.

