

Wojciech ŻUROWSKI¹

OCENA WPŁYWU STANU STRUKTURY MATERIAŁU NA ODPORNOŚĆ NA ZUŻYWANIE TRIBOLOGICZNE

W pracy przedstawiono podstawy badania maksymalizacji odporności na zużywanie tribologiczne układów ciał stałych. Przedstawiono wnioski z badań próbek metali w warunkach maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. Przeprowadzony eksperyment wykazał istotny wpływ struktury materiału elementów układu ciernego na wartość pracy właściwej zużycia w funkcji temperatury dla tego układu. Stwierdzono, że najbardziej korzystne było skojarzenie materiału miękkiego o strukturze sferoidytycznej z materiałem twardym perlityczno-ferrytycznym (również o strukturze drobnoziarnistej). Badania odporności na zużywania tribologiczne wykazały, że nawet niewielka zmiana struktury materiału jednego z elementów pary trącej powoduje zmianę odporności na zużycie układu.

ON THE INFLUENCE OF THE STATE OF THE STRUCTURE OF MATERIAL ON THE RESISTANCE ON THE TRIBOLOGY WASTE

On the job one introduced theoretical bases of the maximization of the resistance on the tribology waste of couples of solids. Besides one introduced motions from research of samples of metals conditioned the maximum resistance on the tribology waste. Carried out experiment showed the essential influence of the structure of material of elements of the frictional arrangement on the power of the specific work of the consumption in the function of the temperature for this arrangement. One ascertained that most profitable had been the association of soft material about the spheroiditic structure with hard material perlitic-ferritic (also about the fine-grained structure). Investigations of the influence of the state of the structure of material on the specific work of the consumption being the measure of the resistance on tribology wastes showed that even the not large change of structure of one material of elements of steam rubbing caused the change of the wear resistance of the arrangement.

1. WPROWADZENIE

Na proces zużywania ma wpływ wiele parametrów powodujących intensyfikację lub ograniczenie zużycia. Parametry takie jak: prędkość, temperatura, obciążenie, właściwości

¹Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Radom 26-600; Krasickiego 54. E-mail: wzurow@pr.radom.pl

materiału czy wpływ ośrodka determinują szybkość zużywania współpracujących elementów.

Prędkość tarcia jest powiązana z temperaturą na powierzchniach stykających się ciał. Wraz ze wzrostem prędkości zwiększa się wydzielane ciepło, które powoduje zmiany własności mechanicznych, fizycznych i chemicznych w warstwie wierzchniej. Wysoka temperatura wpływa na spadek twardości materiałów, a co za tym idzie na zmiany w ich strukturze i większa podatność na odkształcenia. Energia cieplna jest w wielu mechanizmach zużywania bezpośrednią przyczyną zużycia jak również może powodować jego wzrost lub spadek. W naturalnych warunkach, gdy temperatura jest proporcjonalna do prędkości tarcia, obydwa wpływy są podobne. Jeśli sztucznie rozdzielić wpływ temperatury od prędkości tarcia, czyli zmienić prędkość i utrzymać stałą temperaturę, co doświadczalnie sprawdził Kragielski, to okaże się, że decydującym parametrem w przebiegu zużywania jest temperatura [1]. Niezależnie od zmiany prędkości intensywność zużywania w bardzo niskich temperaturach była duża (szepianie), a przy małych prędkościach i sztucznym podgrzewaniu styku intensywność zużywania malała, co było wynikiem modyfikacji warstwy wierzchniej i tworzeniem się ochronnych struktur wtórnych. Zastosowanie bariery termodynamicznej i metodyki wykorzystującej zależność wynikającą z pierwszej zasady termodynamiki pozwala na optymalizację parametrów tarcia tak, aby uzyskać jak najwyższą odporność na zużycie zdefiniowaną jako praca właściwa zużycia.

W układach tarciovych umożliwiających ruch względny ich elementów (np. łożyska czy prowadnice) może występować tarcie ślizgowe lub toczone. Największą uwagę zwraca się na materiały z których mają być wykonane elementy układu, a szczególnie ich warstwy wierzchnie. Dobór odpowiednich materiałów jest bardzo trudny i zależy od wielu czynników takich jak: funkcji tribologicznej układu i jego postaci konstrukcyjnej, od wymagań wytrzymałościowych co do jego elementów, warunków eksploatacyjnych, możliwości technologicznych, wymaganej trwałości niezawodności działania przy uwzględnieniu ekonomiki wytwarzania i eksploatacji. Nie można zestawić szczegółowych zaleceń co do wyboru materiałów na wszystkie ślizgowe węzły tarcia. Istnieją jednak ogólne reguły wyboru materiałów na te węzły [1]:

1. Należy kojarzyć twardy materiał z miękkim, mającym temperaturę rekrytalizacji poniżej średniej temperatury powierzchni tarcia. Zapewni to dodatni gradient własności mechanicznych w głąb materiału.
2. Można kojarzyć twardy materiał z twardym (np. stale hartowane, azotowane i chromowane). Zapewni to dużą odporność na zużycie, pod warunkiem eliminowania spięrzeń nacisków, dokładnego wykonania, stosowania gładkich powierzchni i dokładnego montażu.
3. Należy unikać skojarzenia miękkiego materiału z miękkim. Tego rodzaju skojarzenia materiałowe w wypadku tarcia suchego, a nawet mieszanego, mogą doprowadzić do zatarcia wskutek zużywania adhezyjnego.

Różne warunki tarcia powodują różnego rodzaju zużycia powierzchni w mikro- i makroobjętościach warstwy wierzchniej materiału elementów maszyn. W celu przeciwdziałania destrukcji i dekohezji tej warstwy dobiera się odpowiednie parametry struktury materiału, która kształtuje wszystkie jego właściwości, w tym także tribologiczne.

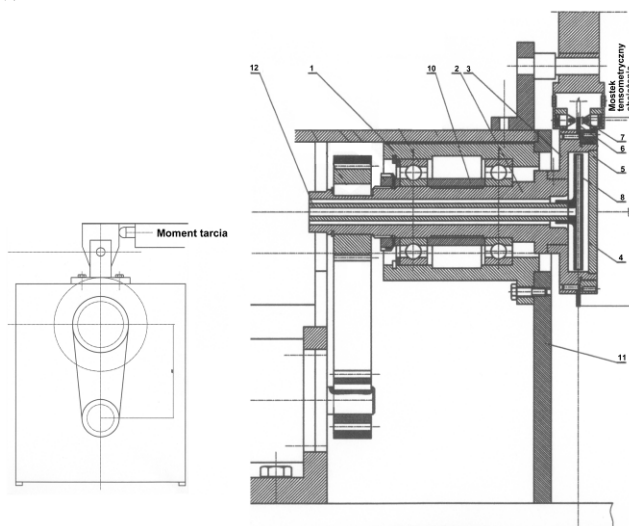
Najistotniejszą cechą materiałów pracujących w warunkach zużycia tarciovego jest heterogeniczna budowa wewnętrzna, składająca się z twardych faz osadzonych w miękkiej (plastycznej) osnowie lub odwrotnie – miękkiej fazy rozłożonej w osnowie o znacznie

wyższej twardości. Twardą fazą są węgliki, azotki, węglikoazotki, fazy międzymetaliczne. Osnowę, o niższej twardości i znacznej plastyczności lub uplastyczniającej się w trakcie tarcia, stanowią podwójne lub wieloskładnikowe roztwory stałe. Udział, rozmieszczenie, kształt i wskaźnik dyspersji faz w ścierającym się stopie nie mogą być jednak dowolne. Danym warunkom zużywania się materiału muszą odpowiadać ściśle określone relacje tribologiczne jego struktur.

Same struktury materiału można modyfikować stosując właściwie dobrane metody obróbki powierzchniowej, pozwalających na uzyskanie wymaganych własności warstwy wierzchniej, a zwłaszcza dużej odporności na zużycie. Zwykle w tym celu wykorzystuje się obróbkę cieplną, cieplno-chemiczną i plastyczną.

2. BADANIA PRACY WŁAŚCIWEJ ZUŻYCIA

Badania wpływu struktury materiału na wartość pracy właściwej zużycia, a dokładniej na wartość temperatury charakterystycznej przeprowadzono na testerze TT3 (rys.1) opracowanym w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej. Za obiekt badań przyjęto układ trących się ciał metalicznych. Realizację fizyczną obiektu badań, podobnie jak we wcześniejszych testerach, stanowi układ pierścieni – ślizgacz. Pierścień stanowi obracający się element pary trącej. Zastosowano jednak dwa nieruchome ślizgacze w postaci próbek o płaskiej powierzchni styku z pierścieniem. Założenia konstrukcyjne i opis testera opublikowano w opracowaniach [2,3,4]. Materiał próbki można dobrać osobno dla każdego skojarzenia, aby możliwa była ocena wpływu własności fizycznych, składu chemicznego, twardości i struktury materiału na zjawisko zwiększania odporności na zużywanie. Możliwe jest zastosowanie zarówno próbek metalicznych, jak i wykonanych z innych materiałów.



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny testera TT-3: 1 – tuleja nośna, 2 – wałek, 3 – tarcza chłodząca, 4 – docisk próbki, 5 – pokrywa tarczy chłodzącej, 6 – przeciwpróbka, 7 – próbka, 8 – tarcza chłodząca, 9 – przewód chłodzący, 10 – tuleja dystansowa, 11 – korpus, 12 – doprowadzenie cieczy chłodzącej.

Przeprowadzono badania odporności na zużycie w warunkach zużywania utleniającego i tarcia suchego w celu zbadania wpływu struktury materiału na temperaturę charakterystyczną dla skojarzenia materiałów: stal C45 we współpracy ze stalą 145Cr6. Wykorzystano 5 skojarzeń:

- stal C45 normalizowana / stal 145Cr6 hartowana (63HRC);
- stal C45 ulepszona cieplnie (niskoodpuszczona 200°C) / stal 145Cr6 hartowana (63HRC)
- stal C45 ulepszona cieplnie (średnioodpuszczona 350°C) / stal 145Cr6 hartowana (63HRC)
- stal C45 ulepszona cieplnie (wysokoodpuszczona 600°C) / stal 145Cr6 hartowana (63HRC)
- stal C45 normalizowana / stal 145Cr6 ulepszona cieplnie wysokoodpuszczona (24HRC).

Przyjęte skojarzenia tarciove różnią się stanem strukturalnym ślizgaczy i pierścienia. W tabeli 1 zestawiono informacje o wykorzystanych materiałach. W tabelach 2 i 3 przedstawiono zdjęcia metalograficzne materiałów i ich opisy strukturalne.

Tab. 1. Charakterystyka materiałów ślizgaczy i pierścienia

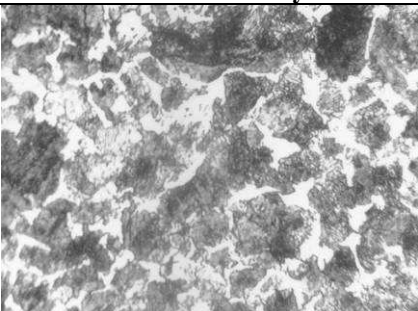
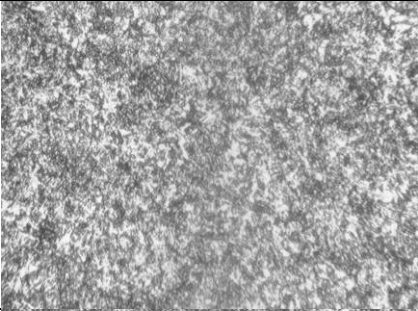
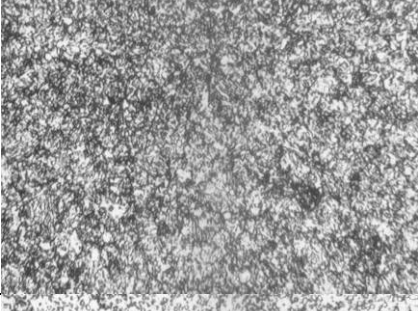
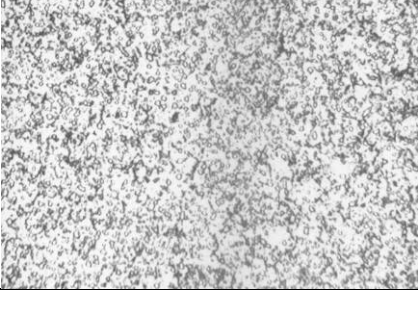
L.p.	Materiał	Stan technologiczny	Twardość	Skład pierwiastkowy
1	Stal C45	normalizowana	18 HRC	C – 0,5 Mn – 0,67 Si – 0,21 Ni – 0,08 Cr – 0,15
2		hartowana i odpuszczona w temp. 200°C	52 HRC	
3		hartowana i odpuszczona w temp. 350°C	38 HRC	
4		hartowana i odpuszczona w temp. 600°C	19 HRC	
6	Stal 145Cr6	hartowana	63 HRC	C – 1,4 Mn – 0,59 Si – 0,28 Ni – 0,08 Cr – 1,6 V – 0,17
7		hartowana i odpuszczona w temp. 200°C	24 HRC	

Skład chemiczny materiałów na podstawie badań własnych przeprowadzonych w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej

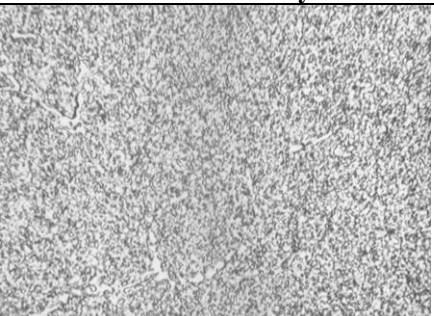

Stal C45 jest stalą konstrukcyjną, węglową, stosowana najczęściej w postaci ulepszonej cieplnie, na średnio obciążone elementy maszyn (osie, wały, koła zębate, tarcze). Przeprowadzono badania struktury zarówno stali C45 w postaci normalizowanej, jak i po ulepszeniu cieplnym.

Stal 145Cr6 jest stalą narzędziową do pracy na zimno; do hartowania w oleju, stabilną wymiarowo po hartowaniu, odporną na ścieranie.

Tab. 2. Opis struktur stali C45

Materiał	Widok struktury	Opis struktury
stal C45 norm.		struktura perlityczno-ferrytyczna; ferryt wokół równoosiowych ziaren perlitu o dużej dyspersji; ziarna perlitu są średniej wielkości (skala nr 7)
stal C45 odp. 200°C/1h		struktura martenzytu niskoodpuszczonego; martenzyt o budowie drobnoiglastej, czyli prawidłowej z metalograficznego punktu widzenia
stal C45 odp. 350°C/1h		struktura sorbityczna; widoczny częściowo układ iglasty sorbitu
stal C45 odp. 600°C/1h		drobny sferoidyt; kulki cementytu równomiernie rozmieszczone w osnowie ferrytu

Tab. 3. Opis struktur stali 145Cr6

Material	Widok struktury	Opis struktury
stal 145Cr6 hart. 63HRC		struktura martenzytu drobnoiglastego (skrytoiglastego) z niewielką ilością bardzo drobnych węglików $(Fe,Cr)_3C$
stal 145Cr6 odp. 640°C/2h 24HRC		drobny sferoidyt (feryt + węgliki $(Fe,Cr)_3C$); węgliki rozmieszczone są statystycznie równomiernie w osnowie ferrytu

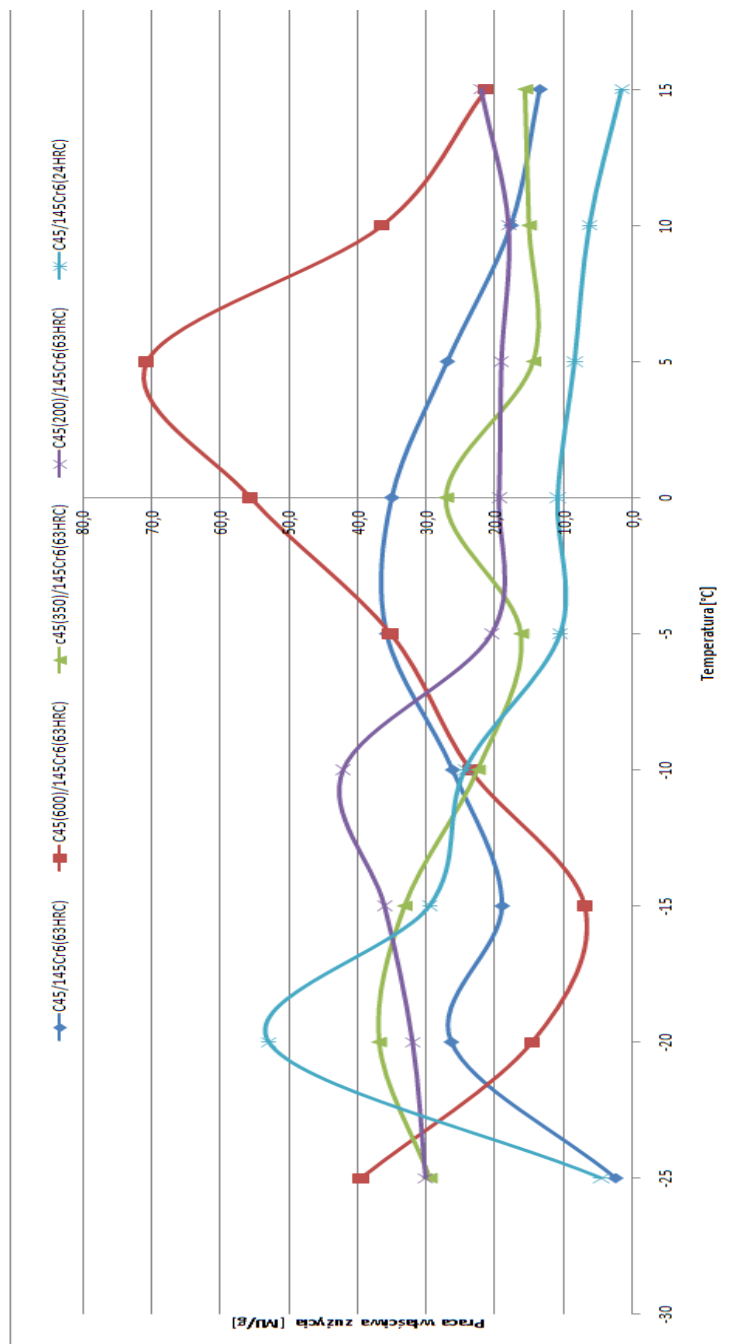
Badania temperatury charakterystycznej opisane w pracach [5,7,8,9,10] wskazały na wartości parametry procesu tarcia dla wybranych skojarzeń metali technicznych. Ujawniono przy tym i scharakteryzowano wpływ temperatury, nacisku i prędkości poślizgu na pracę właściwą zużycia. Korzystając z dotychczasowych wyników, wynikających z przeprowadzenia doświadczeń optymalizacyjnych, przeprowadzono badania odporności na zużycie w zakresie temperatur strefy tarcia w zakresie $-25^{\circ}C \div +15^{\circ}C$, z zachowaniem stałej wartości współczynnika tarcia ($=0,4$) oraz prędkości poślizgu i nacisków podanych w wymienionych pracach. Przyjęto nacisk $p=14,7N$, prędkość poślizgu $v=0,4$ m/s, czas próby 30 minut. Zużycie masowe mierzone było za pomocą wagi precyzyjnej z dokładnością do 0,01 mg. Próbki były docierane przed rozpoczęciem pomiarów pod obciążeniem równym pomiarowemu. Czas docierania ustalono na 3600 s.

W badaniach wyliczono pracę właściwą zużycia wg wzoru:

$$e_x^r = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot t}{\Delta m_c} \text{ [MJ/g]} \quad (1)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia,
 p – nacisk [N],
 v – prędkości poślizgu [m/s],
 t – czas próby [s],
 Δm_c – zmiana masy układu [g]

Każdy pomiar powtarzano sześciokrotnie, a następnie opracowano statystycznie. Zbiorcze wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ struktury na pracę właściwą zużycia w funkcji temperatury

3. WNIOSKI

Przeprowadzony eksperyment wykazał istotny wpływ struktury materiału elementów układu ciernego na wartość pracy właściwej zużycia w funkcji temperatury dla tego układu. Osiągnięte wartości maksymalne pracy właściwej zużycia rozłożone są w zakresie od -20°C do $+5^{\circ}\text{C}$. Jednocześnie wartość pracy właściwej zużycia zmienia się w zakresie $35\div 71$ MJ/mg, czyli praktycznie dwukrotnie.

Największa wartość pracy właściwej zużycia została osiągnięta dla skojarzenia próbki o niskiej twardości ze strukturą drobno sferoidytyczną w skojarzeniu z twardą przeciwpróbką o strukturze drobnoiglastego martenzytu. Najmniejsza wartość pracy właściwej zużycia wystąpiła dla pary ze strukturą próbki perlityczno-ferrytyczną i ziarnami perlitu o średniej wielkości współpracującej z przeciwpróbką z drobnoiglastym martenzytem. Pozostałe skojarzenia charakteryzowały się pośrednimi wartościami pracy właściwej zużycia. Spostrzegamy, że najbardziej korzystne było skojarzenie materiału miękkiego o strukturze sferoidytycznej z materiałem twardym perlityczno-ferrytycznym (również o strukturze drobnoziarnistej).

Wyjaśnienie otrzymanych wyników wymaga dalszych badań. Jest co najmniej prawdopodobne, że materiał miękki ulega umocnieniu poprzez tworzenie się tarciovych struktur wtórnych na powierzchniach współpracujących elementów, m.in. martenzytu bezpostaciowego. Może o tym świadczyć zwiększenie twardości na powierzchniach współpracujących o $3\div 6$ jednostek. Znaczącą rolę mogą także odgrywać produkty zużycia (tlenki), a szczególnie ich struktura i wielkość ziarna.

Badania wpływu stanu struktury materiału na pracę właściwą zużycia będącą miarą odporności na zużywania tribologiczne wykazały, że nawet niewielka zmiana struktury materiału jednego z elementów pary trącej powoduje zmianę odporności na zużycie układu. Podejście fenomenologiczne, nie biorące pod uwagę budowy i właściwości mikroskopowych materii nie może być stosowane w sposób mechaniczny. Zawsze należy brać pod uwagę, że para trąca to układ elementów o ściśle zdefiniowanych parametrach. Są to: skład chemiczny i stan mikrostrukturalny. Dla takiego, zdefiniowanego układu, możliwe jest stosowanie podejścia fenomenologicznego, jednak zmiana, np. w wyniku obróbki cieplnej, struktury któregoś z elementów w efekcie generuje nowy układ.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1993.
- [2] Żurowski W.: Stanowiska do badań maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne. Logistyka nr 2/2008. Str. 86.
- [3] Żurowski W.: Stanowisko do badań odporności na zużycie cierne układów sprzęgających. Logistyka nr 3/2009. Str. 88
- [4] Żurowski W.: Stanowisko do badań układów sprzęgających w warunkach ich zwiększonej odporności na zużycie cierne. Tribologia nr 5/2009. Str. 283÷291.
- [5] Żurowski W., Sadowski J.: Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie tribologiczne; Cz. I/II Inżynieria Powierzchni nr 4/2000, 1/2001, IMP – Warszawa.

- [6] Żurowski W.: Badania eksperymentalne maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. Tribologia nr 4/2004 (196). str. 369÷377.
- [7] Żurowski W.: Badania maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne na zmodyfikowanej maszynie T-01. Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [8] Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie. Praca doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.
- [9] Żurowski W.: Teoretyczno-eksperymentalne podstawy maksymalizacji odporności na zużywanie tribologiczne. Tribologia 2005, Nr 3.
- [10] Żurowski W.: Wear resistance maximization of frictional interface circuits (in Tribology 2008). SAIT. ISBN: 978-0-620-38082-9. Pretoria 2008.