

O problemach z określaniem wybranych własności mechanicznych stali 41Cr4

The problems in determining the selected mechanical properties of 41Cr4 steel

MARCIN GRABA*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.331

Krótko omówiono tematykę wyznaczania wybranych stałych materiałowych oraz odporności na pękanie stali 41Cr4. Przedstawiono uzyskane wyniki doświadczalne, zamieszczono ich skromną analizę statystyczną oraz wskazano na trudności pojawiające się przy określaniu odporności na pękanie materiałów, dla których nie planowano wcześniej przebiegu badań doświadczalnych. Na koniec zaproponowano sposób interpretacji wyników doświadczalnych dotyczących odporności na pękanie.

SŁOWA KLUCZOWE: własności mechaniczne, odporność na pękanie, SEN(B), stal 41Cr4

Presented is the discussion about the determination of selected material constants and fracture toughness of 41Cr4 steel. The experimental results are presented and their statistical analysis is made. The paper shows the difficulties of determining the fracture toughness for the materials, which research weren't planned before the start of the tests. At the end of the paper, the method of interpretation of the obtained experimental results is proposed.

KEYWORDS: mechanical properties, fracture toughness, SEN(B), 41Cr4 steel

W 2006 r. w krajach Unii Europejskiej opublikowano dokument – procedury FITNET [1]. Został on szeroko zaprezentowany w [2]. Dokument ten podsumowuje procedury pozwalające oszacować wytrzymałość zróżnicowanych konstrukcji, przede wszystkim konstrukcji z różnymi defektami. Procedury podzielone są na moduły, które odnoszą się do prostych elementów konstrukcyjnych (płyty z defektami, belek, prętów, rur – elementy te można w praktyce inżynierskiej wykorzystywać do idealizacji złożonych konstrukcji), wybranych połączeń spawanych czy też elementów, dla których konieczne jest przeprowadzenie analizy wytrzymałości zmęczeniowej. Podstawą szeregu zaleceń dotyczących określania wytrzymałości konstrukcji z defektami są stałe materiałowe [3]. Do takiej analizy inżynier potrzebuje pewnych danych o materiale, m.in. granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, modułu Younga, czasami współczynnika Poissona (są to typowe stałe materiałowe) oraz odporności na pękanie. Ten ostatni parametr przez lata według wielu norm przedmiotowych [4, 5] uznawany był również za stałą materiałową przy spełnieniu szczególnych założeń, jednak już w 1999 r. procedury SINTAP [6] i literatura późniejsza [1, 2] zweryfikowały tę definicję, przypisując odporności na pękanie miano cechy materiału.

O ile wyznaczenie stałych materiałowych na podstawie jednoosiowej próby rozciągania nie budzi wątpliwości [7], to odporność na pękanie wyznacza się przez zbadanie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprę-

żeń – dla materiałów kruchych lub przez określenie krytycznej wartości całki J – dla materiałów sprężysto-plastycznych [4, 5]. Można także laboratoryjnie wyznaczać rozwarcie wierzchołka pęknięcia i poszukiwać jego krytycznej wartości, która również jest uznawana za miarę odporności na pękanie, jednak ta procedura często wiąże się z koniecznością wykorzystania dodatkowego oprzyrządowania maszyny wytrzymałościowej [5].

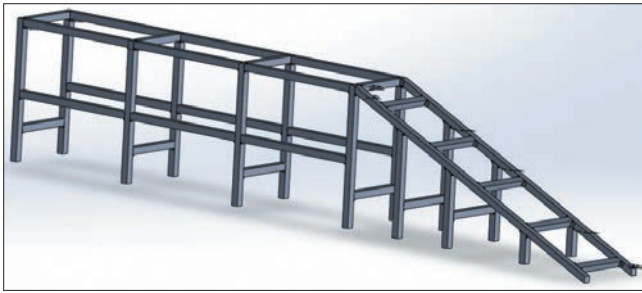
Najbardziej odpowiednią miarą określającą odporność na pękanie sprężysto-plastycznych materiałów konstrukcyjnych, charakteryzujących się wykładnikiem umocnienia w prawie Ramberga-Osgooda (R-O) $n \geq 10$, wydaje się krytyczna wartość całki $J - J_{IC}$ – w przypadku materiałów pękających ciągliwie, lub krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń $K - K_{IC}$ (z reguły wykładnik w prawie R-O $n < 10$) – w przypadku materiałów pękających krucho. Wspomniane normy przedmiotowe określające, jak wyznaczyć odporność na pękanie, podają szereg zaleceń, które powinien spełniać materiał, a raczej wymiary wycinanych z niego próbek, by test odporności został poprawnie wykonany. Jeśli planowany jest szeroki program badawczy, można sobie pozwolić na przygotowanie wielu próbek i przeprowadzenie fazy testów, by potem w trakcie badań laboratoryjnych otrzymać zadowalające wyniki [8, 9].

Jednakże zamysłem twórców procedur FITNET, a wcześniej również procedur SINTAP [1, 6], było takie wykorzystanie mechaniki pękania oraz stworzenie takich narzędzi, aby na każdym etapie życia konstrukcji – projektowania, produkcji i eksploatacji – można było ocenić jej wytrzymałość, w momencie gdy pojawi się defekt. Procedury te są przejrzyste, jednakże ich stosowanie wymaga posiadania określonych informacji o materiale – charakterystycznych stałych wyznaczanych w trakcie jednoosiowej próby rozciągania oraz odporności na pękanie. Na etapie projektowania konstruktor (inżynier) doskonale wie, jakiego materiału użyje, jest w stanie przeprowadzić szereg analiz, by po doborze właściwej obróbki cieplnej (względnie cieplno-chemicznej) uzyskać pożądane własności mechaniczne i odporność na pękanie. Problem stanowi ocena wytrzymałości konstrukcji już istniejącej, o której w zasadzie nic nie wiadomo – znane jest tylko oznaczenie stali wykorzystanej w tej konstrukcji. Nie można wówczas planować programu badawczego, rodzajów badań, obróbki cieplnej. Pozostaje jedynie uzyskanie fragmentu konstrukcji i przeprowadzenie badań, które pozwolą wyznaczyć stałe materiałowe oraz odporność na pękanie. W niniejszej pracy zdecydowano się pokazać, jakie trudności mogą zaskoczyć inżyniera w takiej sytuacji.

Analizowana konstrukcja, materiał, geometria próbek

Wiele obiektów technicznych i konstrukcyjnych, które dziś są eksploatowane, ma bardzo skąpą dokumentację projektową, zawierającą dane o materiale czy wymiarach

* Dr inż. Marcin Graba (mgraba@tu.kielce.pl) – Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

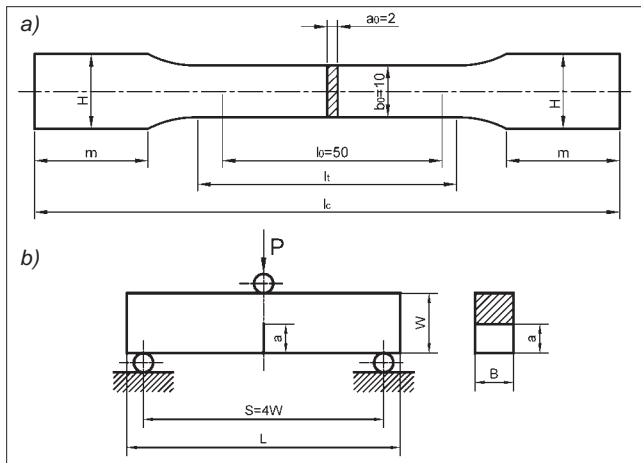


Rys. 1. Fragment najazdu dla samochodów – rysunek opracowany z wykorzystaniem programu SOLIDWORKS

geometrycznych. Przykładem takiej konstrukcji może być fragment najazdu zaprezentowany na rys. 1.

Konstrukcja zespawana jest z prętów o przekroju kwadratowym 25×25 mm, średni wymiar charakterystyczny spoiny wynosi ok. $7 \div 10$ mm. Dopuszczenie do użytku najazdów złożonych z tak przygotowanych konstrukcji wymagało określenia własności mechanicznych oraz odporności na pękanie. Znaczną część zaprezentowanej konstrukcji pocięto na mniejsze kawałki, usunięto fragmenty bezpośrednio związane ze spoinami i strefami wpływu ciepła, by przygotować próbki do badań w zakresie statycznej próby rozciągania i odporności na pękanie.

Oznaczenie składu chemicznego pozwoliło stwierdzić, że konstrukcję wykonano ze stali odpowiadającej składem stali 41Cr4, w Polsce oznaczanej przez długi czas jako 40H. Jest to materiał bardzo trudno spawalny – przed spawaniem powinien być podgrzewany, a następnie obrabiany cieplnie [10÷12]. Stosuje się go z reguły na silnie obciążone wały, korbodowy, tuleje, osie, przekładnie zębate, tarcze ściernie, korpusy przyrządów oraz formy o większej trwałości. Jest to stal chromowa, przeznaczona do ulepszenia cieplnego, o średniej hartowności. W tabl. I zaprezentowano skład chemiczny stali 41Cr4 (40H) [10÷12].



Rys. 2. Próbki płaskie wykorzystane do wyznaczenia stałych materiałowych w jednoosiowej próbie rozciągania (a). Próbki typu SEN(B) wykorzystane do wyznaczenia odporności na pękanie (b); a_0 – grubość początkowa próbki poddawanej rozciąganiu, b_0 – szerokość początkowa próbki poddawanej rozciąganiu (a_0 , b_0 – charakterystyczne wymiary przekroju poprzecznego próbek rozciąganych), l_0 – baza pomiarowa, l – długość (fragment) próbki o wymiarach przekroju poprzecznego $a_0 \times b_0$, l_c – długość całkowita próbki poddawanej rozciąganiu, m – długość fragmentu próbki wykorzystywanego do jej zamocowania w maszynie wytrzymałościowej, H – szerokość fragmentu próbki wykorzystywanego do jej zamocowania w maszynie wytrzymałościowej (m i H – wymiary charakterystycznych fragmentów próbek poddawanych rozciąganiu, które ułatwiają ich zamocowanie w maszynie wytrzymałościowej); P – siła obciążająca próbkę SEN(B) w trakcie wyznaczania odporności na pękanie, B – grubość próbki SEN(B), a – długość początkowa pęknięcia w próbkach SEN(B), S – rozstaw podpór, W – szerokość próbki SEN(B), L – długość całkowita próbek SEN(B)

TABLICA I. Skład chemiczny stali 41Cr4 (dawniej 40H) w %

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	S	P
0,36÷0,45	0,17÷0,37	0,5÷0,9	0,8÷1,2	maks. 0,1	maks. 0,3	maks. 0,05	maks. 0,2	maks. 0,035	maks. 0,035

Aby wyznaczyć stałe materiałowe charakterystyczne dla jednoosiowej próby rozciągania, zgodnie z zaleceniami normy [13] przygotowano płaskie próbki o przekroju prostokątnym $a_0 \times b_0 = 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (czynne pole przekroju poprzecznego wynosiło ok. $S_0 = 20 \text{ mm}^2$) oraz bazie pomiarowej $l_0 = 50 \text{ mm}$ (rys. 2a). Do wyznaczenia odporności na pękanie zgodnie z normą [4, 5] zdecydowano się wykorzystać próbki typu SEN(B) – *single edge notched specimen under bending* – belkę z jednostronnym pęknięciem poddawaną zginaniu (rys. 2b). Próbki SEN(B) charakteryzowały się szerokością $W = 25 \text{ mm}$, co determinowało rozstaw podpór $S = 4 \times W = 100 \text{ mm}$.

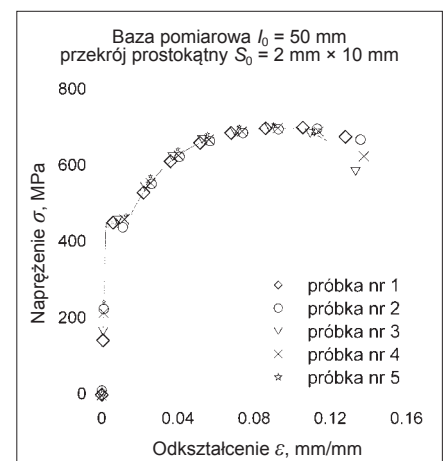
W trakcie planowania badań zdecydowano o przygotowaniu próbek o trzech grubościach $B = \{5, 10, 15\} \text{ mm}$ oraz względnej długości pęknięcia $a/W = 0,50$ – względna długość pęknięcia determinowana jest założeniami normy [4, 5]. Wykorzystano pięć próbek do statycznej próby rozciągania oraz dziewięć próbek do określenia odporności na pękanie. Wszystkie próby wytrzymałościowe i próby odporności na pękanie przeprowadzono na hydropulsacyjnej maszynie wytrzymałościowej firmy MTS – MTS 810.

Statyczna próba rozciągania i wyznaczone stałe materiałowe

Statyczną próbę rozciągania wykonano zgodnie z normą [13]. Prędkość rozciągania wynosiła $0,05 \text{ mm/s}$ – zatem szybkość odkształcenia wynosiła ok. $10^{-3} 1/s$. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rys. 3, natomiast w tabl. II zestawiono wyznaczone w trakcie statycznej próby rozciągania stałe materiałowe oraz własności plastyczne stali 41Cr4.

Analiza pokazała, że badana stal ma wyraźną granicę plastyczności. Średnia wartość granicy górnej plastyczności R_{eh} wynosi ok. 462 MPa , wytrzymałości na rozciąganie R_m ok. 707 MPa , natomiast średnie naprężenia przy zerwaniu R_b wynoszą ok. 589 MPa . W trakcie statycznych prób rozciągania wyznaczono również moduł Younga E – jego średnia wartość wynosi 209 GPa . Moduł Younga wyznaczono z nachylenia linii najlepszego liniowego dopasowania 500 kolejnych punktów z zakresu sprężystego na wykresie naprężenie–wydłużenie względne.

W tabl. II znajdują się również wyznaczone zgodnie z normą [13] własności plastyczne oraz wartość odkształceń ϵ_m odpowiadających wytrzymałości na rozciąganie R_m , które wykorzystano do wyznaczenia wykładnika



Rys. 3. Zarejestrowane w trakcie badań doświadczalnych krzywe rozciągania dla stali 41Cr4

TABLICA II. Wyniki statycznej próby rozciągania stali 41Cr4

Próbka	S_0 , mm ²	E , GPa	R_{eh} , MPa	R_m , MPa	R_b , MPa	A_g	A_{gt}	A_c	A_t	ϵ_m	n
nr 1	20,16	209	460	706	588	0,097	0,100	0,146	0,149	0,100	8,90
nr 2	20,18	208	473	703	590	0,102	0,105	0,150	0,153	0,105	9,66
nr 3	20,00	209	450	705	577	0,086	0,089	0,131	0,134	0,089	8,28
nr 4	20,20	202	469	705	589	0,094	0,098	0,141	0,144	0,098	9,19
nr 5	20,10	216	459	714	601	0,085	0,088	0,127	0,130	0,088	8,42
Średnia		209	462	707	589	0,093	0,096	0,139	0,142	0,096	8,89
Minimalna		202	450	703	577	0,085	0,088	0,127	0,130	0,088	8,28
Maksymalna		216	473	714	601	0,102	0,105	0,150	0,153	0,105	9,66
Mediana		209	460	705	589	0,094	0,098	0,141	0,144	0,098	8,90

Legenda: S_0 – przekrój prostokątny, E – moduł Younga, R_{eh} – średnia wartość granicy górnej plastyczności, R_m – wytrzymałość na rozciąganie, R_b – średnie naprężenia przy zerwaniu, A_g – wydłużenie nieproporcjonalne przy największej sile, A_{gt} – wydłużenie całkowite przy maksymalnej sile, A_c – wydłużenie po rozerwaniu, A_t – wydłużenie całkowite przy rozerwaniu, ϵ_m – odkształcenia odpowiadające wytrzymałości na rozciąganie, n – wykładnik potęgowy w prawie R-O

potęgowego n w prawie R-O, niezbędnego do opisania krzywych rozciągania prawem potęgowym postaci:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \begin{cases} \sigma/\sigma_0 & \text{dla } \sigma \leq \sigma_0 \\ \alpha(\sigma/\sigma_0)^n & \text{dla } \sigma > \sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: ϵ – odkształcenie w dowolnym punkcie pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie, ϵ_0 – odkształcenie odpowiadające granicy plastyczności ($\epsilon_0 = \sigma_0/E$), δ – naprężenie odpowiadające odkształceniu ϵ , σ_0 – granica plastyczności, α – stała potęgowa w prawie R-O, n – wykładnik potęgowy w prawie R-O.

Wykładnik potęgowy n w prawie R-O jest niezbędny do sformułowania związku konstytutywnego w trakcie oceny różnych parametrów z zakresu mechaniki pęknięcia z wykorzystaniem metody elementów skończonych, jeżeli zachodzi potrzeba posługiwania się modelową krzywą rozciągania materiału. Szacując wartość wykładnika potęgowego n , założono stałą potęgową $\alpha = 1$, a obliczenia przeprowadzono dla punktu odpowiadającego wytrzymałości na rozciąganie. Wyznaczone na podstawie wzoru (1) wartości wykładnika umocnienia n podano w tabl. II.

Tabela II oprócz pełnego zestawienia wyznaczonych stałych materiałowych oraz własności plastycznych zawiera statystyczne porównanie otrzymanych doświadczalnie wartości (podano wartości minimalne i maksymalne, wartość średnią oraz medianę). Maksymalna różnica pomiędzy wynikami doświadczalnymi a wyznaczoną wartością minimalną wynosi: prawie 7%, 5%, 1,5% oraz prawie 17% odpowiednio dla: modułu Younga E , górnej granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wykładnika n w prawie R-O. Jeżeli natomiast punktem odniesienia będzie wartość średnia (bardzo zbliżona dla wszystkich parametrów do mediany), maksymalny rozrzut wynosi odpowiednio: 3,5%, prawie 3%, 1% oraz prawie 9% dla wymienionych stałych materiałowych.

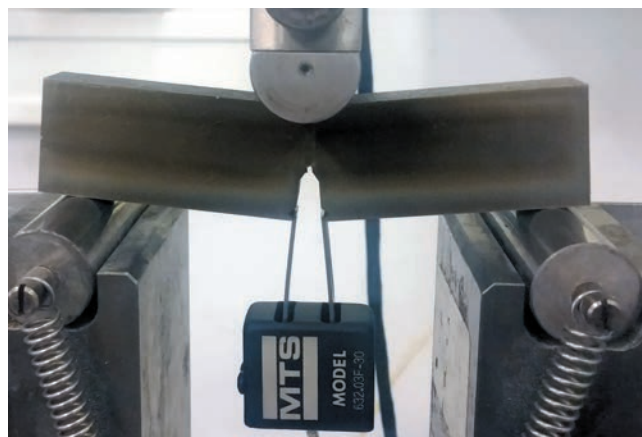
Badanie odporności na pęknięcie, uzyskane wyniki i ich interpretacja

Otrzymane w statycznej próbie rozciągania wyniki – wykresy z wyraźną granicą plastyczności – determinują konieczność oszacowania odporności na pęknięcie w postaci krytycznej wartości całki J – sprężysto-plastycznego pa-

rametru mechaniki pęknięcia. Krytyczną wartość całki J można uzyskać doświadczalnie metodą wielu próbek lub metodą jednej próbki, w przypadku której dopuszcza się technikę spadku potencjału lub technikę zmiany podatności [4, 5, 14]. Pierwsza metoda wymaga przygotowania wielu takich samych próbek i prowadzenia badań, aby uzyskać różny przyrost pęknięcia. Jest ona dość kosztowna. Druga metoda pozwala wykorzystać tylko jedną próbkę, ale warto zrobić więcej prób doświadczalnych, by wykluczyć ewentualny rozrzut wyników.

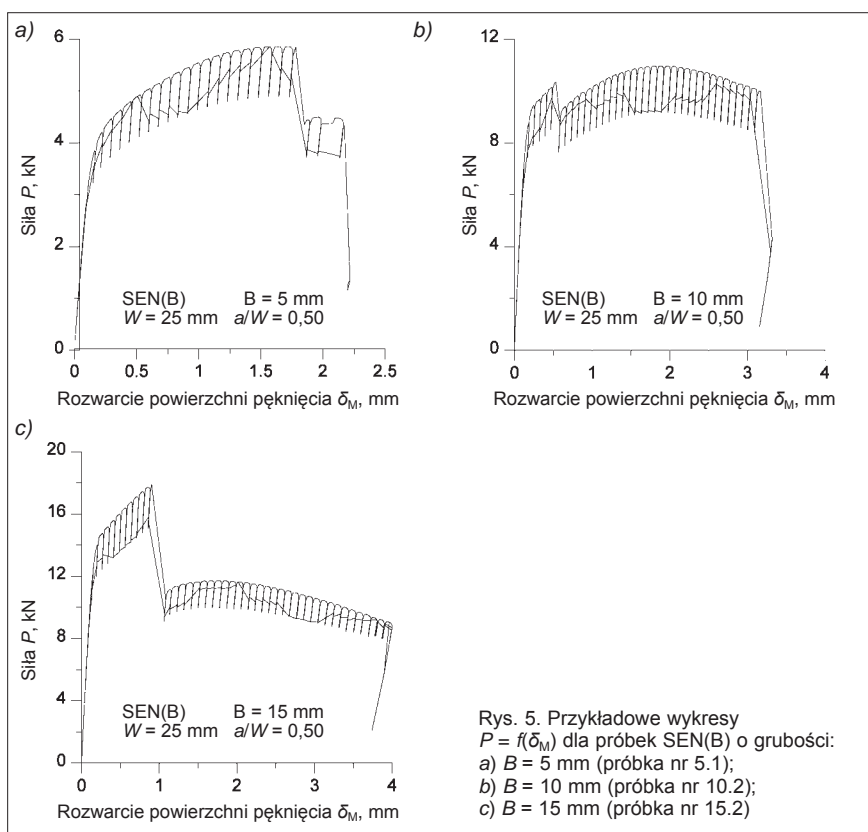
Zdecydowano się wyznaczyć odporność na pęknięcie metodą jednej próbki – techniką zmiany podatności. Badanie to polega na wykorzystaniu zjawiska zmiany przekroju czynnego próbki podczas przyrostu długości pęknięcia. Przyrost długości pęknięcia wpływa na sztywność próbki, a co za tym idzie zmienia się jej podatność, która jest odwrotnością sztywności. Podatność należy zmierzyć w momencie odciążania próbki, co oznacza, że próby trzeba przeprowadzać z odpowiednio dobranymi odciążeniami. Więcej szczegółów na temat próby i zjawisk fizycznych zachodzących w materiale można znaleźć w [14÷16].

Próby odporności na pęknięcie wykonano z wykorzystaniem maszyny hydraulicznej MTS 810 i czujnika rozwarcia MTS 632.03F-30 Opt.004. Przedtem w próbkach nacinano karb i wyprowadzano przedpęknięcie – szczylną zmęczeniową, wykorzystując sinusoidalny przebieg obciążenia o współczynniku asymetrii cyklu $R = 0,1$, częstotliwości $f = 20$ Hz i sile wskazującej na czasową maksymalną wartość współczynnika intensywności naprężeń $K_{max} = 20$ MPa · m^{0,5}. Całkowita długość pęknięcia każdej z badanych próbek wynosiła $a = 12,5$ mm (długość nacinanego karbu 11 mm oraz 1,5 mm pęknięcia zmęczeniowego). Właściwą próbę odporności na pęknięcie prowadzono przy prędkości obciążenia 0,01 mm/s. Odciążenia tak zaprogramowano, by występowały co 0,1 mm przyrostu rozwarcia pęknięcia mierzonego na brzegu próbki. Prędkość odciążenia wynosiła 1 kN/s, przy czym ustalono, że pięć odciążań zostanie zrealizowanych do 85% wartości siły maksymalnej. Próby prowadzono od osiągnięcia maksymalnego zakresu pomiarowego czujnika rozwarcia –

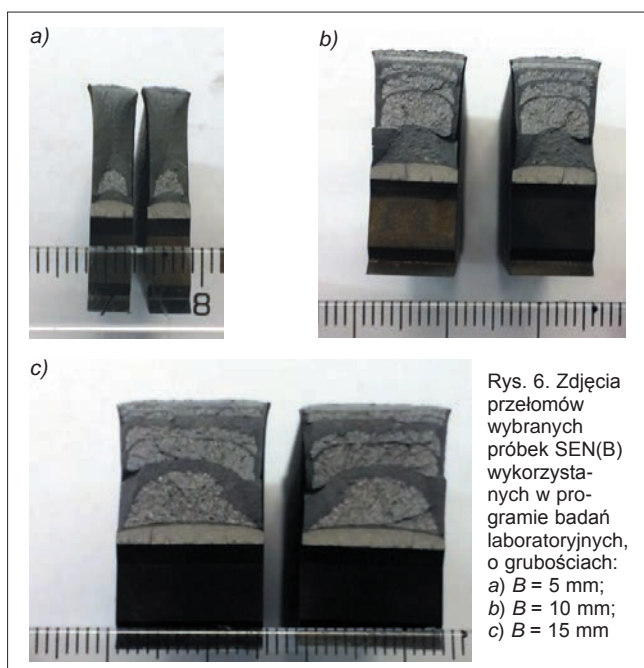


Rys. 4. Próbkę SEN(B) trójpunktowo zginana na maszynie wytrzymałościowej w trakcie wyznaczania odporności na pęknięcie z założonym czujnikiem rozwarcia powierzchni pęknięcia δ_M





Rys. 5. Przykładowe wykresy $P = f(\delta_M)$ dla próbek SEN(B) o grubości:
 a) $B = 5$ mm (próbka nr 5.1);
 b) $B = 10$ mm (próbka nr 10.2);
 c) $B = 15$ mm (próbka nr 15.2)



Rys. 6. Zdjęcia przełomów wybranych próbek SEN(B) wykorzystanych w programie badań laboratoryjnych, o grubościach:
 a) $B = 5$ mm;
 b) $B = 10$ mm;
 c) $B = 15$ mm

ok. 4 mm, a następnie dołamywano próbki przy ręcznym sterowaniu tłokiem maszyny wytrzymałościowej. Na rys. 4 zaprezentowano próbkę na maszynie wytrzymałościowej w trakcie testu.

Zgodnie z zaleceniami normy w trakcie prób mających na celu wyznaczenie odporności na pękanie rejestrowano zmiany w czasie sygnałów siły P działającej na próbkę, przemieszczenia punktu przyłożenia siły v_{LL} oraz rozwarcie powierzchni pęknięcia na brzegu próbki oznaczone zgodnie z normą jako δ_M [4, 5]. Na rys. 5 zaprezentowano wybrane przebiegi $P = f(\delta_M)$ dla próbek wykorzystanych w programie badań laboratoryjnych. Daje się zauważyć, że wraz ze wzrostem grubości próbki rośnie wartość siły niezbędnej do jej złamania.

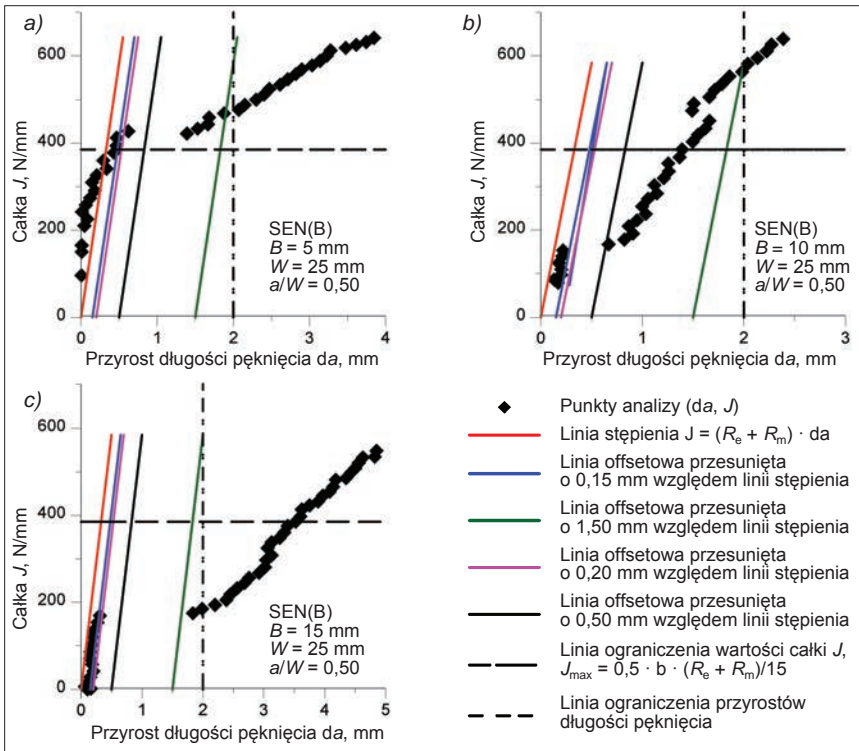
Na zdjęciach przełomów wybranych próbek (rys. 6) widać charakterystyczne wargi i ślady bardzo dużych odkształceń plastycznych w okolicach wierzchołka pęknięcia, co – jak się okazało – miało bardzo duży wpływ na wyniki metody podatnościowej. Zdjęcia wskazują również na fakt skokowego wzrostu długości pęknięcia, co potwierdzają zaprezentowane na rys. 5 wykresy $P = f(\delta_M)$, na których obserwuje się gwałtowne spadki siły wskutek skokowego, nagłego wzrostu długości pęknięcia. Takie zachowanie materiału można tłumaczyć występowaniem wyraźnej granicy plastyczności oraz niewielkim poziomem umacniania się materiału – wyznaczony na podstawie wyników statycznej próby rozciągania wykładnik potęgowy n w prawie R-O wynosi ok. 9, co według niektórych badaczy pozwala zakwalifikować taki materiał jako słabo się umacniający [17, 18].

Po przeprowadzeniu badań doświadczalnych przystąpiono do właściwej analizy mającej na celu oszacowanie odporności na pękanie wyrażanej krytyczną wartością całki J .

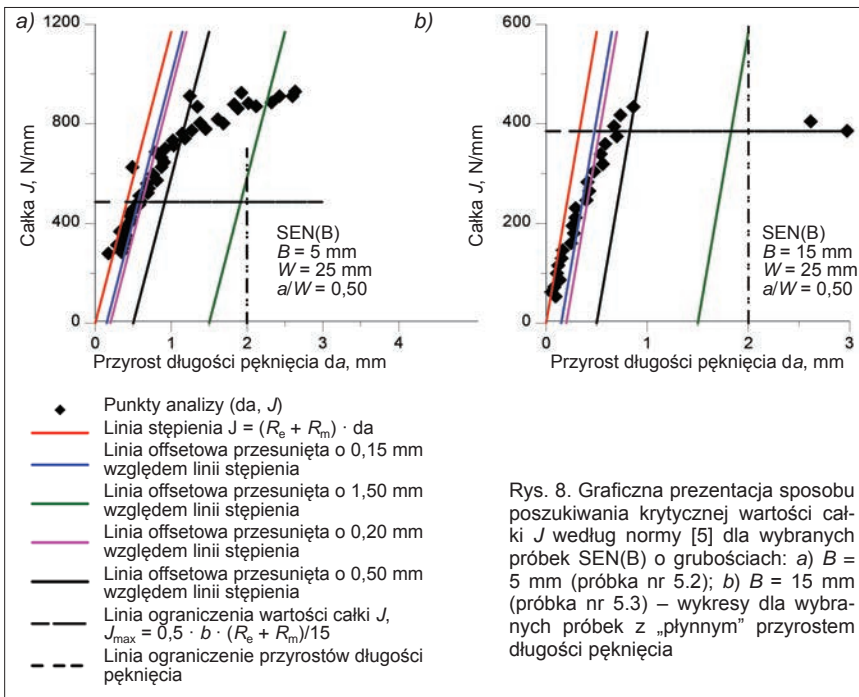
Wykorzystano dostarczone przez producenta maszyny wytrzymałościowej oprogramowanie 793.50 MTS Fracture Toughness wersja 4.10. Aplikacja ta analizuje zarejestrowane w trakcie badań sygnały zgodnie z zaleceniami normy [5]. Efektem analizy jest plik tekstowy zawierający dane niezbędne do określenia odporności na pękanie zgodnie z normą [5] według metody jednej próbki i techniki zmiany podatności [5]. Program 793.50 MTS Fracture Toughness wersja 4.10 automatycznie oblicza zmianę podatności i zgodnie z normą wyznacza przyrost długości pęknięcia oraz analizuje pole pod krzywą $P = f(\delta_M)$ w celu oszacowania energii niezbędnej do wyznaczenia wartości całki. W kolejnym kroku, zgodnie z zaleceniami [5], program kreśli wykres całki J w funkcji przyrostu długości pęknięcia, a na podstawie danych ze statycznej próby rozciągania rysuje linię stępienia [5, 14÷16] oraz linie ograniczające wynikające z warunków podanych w normie [5]. Na rys. 7 zaprezentowano przykładowe rezultaty analizy otrzymane z wykorzystaniem programu 793.50 MTS Fracture Toughness wersja 4.10.

W analizie dotyczącej oceny odporności na pękanie według normy ASTM [5] należy brać pod uwagę jedynie punkty ograniczone osiami układu współrzędnych oraz liniami ograniczenia dla maksymalnej wartości całki J (pozioma linia na wykresach) i linią ograniczającą właściwe przyrosty długości pęknięcia (norma ASTM [5] w różnych wersjach podaje, by linię tę rysować według równania $da = (0,10 \div 0,25) \cdot b_0$, gdzie b_0 jest początkową długością niepękniętego odcinka próbki). Kolejne ograniczenie wpływające na ważność testów wynika z konieczności rysowania linii offsetowych – pomiędzy liniami offsetowymi 0,15 mm i 0,50 mm oraz 0,50 mm i 1,50 mm powinno się znajdować co najmniej po jednym punkcie analizy. W przypadku analizowanego materiału dla siedmiu z dziewięciu wykorzystanych próbek uzyskane w wyniku analizy wykresy $J = f(da)$ były bardzo podobne do tych zaprezentowanych na rys. 7. Na wykresach





Rys. 7. Graficzna prezentacja sposobu poszukiwania krytycznej wartości całki J według normy [5] dla wybranych próbek SEN(B) wykorzystanych w programie badawczym, o grubościach: a) $B = 5$ mm (próbka nr 5.1); b) $B = 10$ mm (próbka nr 10.2); c) $B = 15$ mm (próbka nr 15.2) – wykresy dla wybranych próbek z charakterystycznym skokowym przyrostem długości pęknięcia



Rys. 8. Graficzna prezentacja sposobu poszukiwania krytycznej wartości całki J według normy [5] dla wybranych próbek SEN(B) o grubościach: a) $B = 5$ mm (próbka nr 5.2); b) $B = 15$ mm (próbka nr 5.3) – wykresy dla wybranych próbek z „płynnym” przyrostem długości pęknięcia

krzywych $J = f(da)$ występowała charakterystyczna przerwa – wynika to z faktu skokowego przyrostu długości pęknięcia – co można już zaobserwować na wykresach $P = f(\delta_M)$ – rys. 5. Tylko w przypadku dwóch próbek SEN(B) zaobserwowano niemalże „płynny” przyrost pęknięcia (rys. 8). Jednakże również w tych przypadkach wymagany przez normę [5] limit punktów nie jest spełniony i prób nie można uznać za ważne. Okazuje się więc, że zaprezentowana norma nie pozwala wyznaczyć odporności na pęknięcie J_C dla rozważanego materiału, jakim jest stal 41Cr4.

Mniej restrykcyjna jest polska norma [4], która wciąż obowiązuje w kraju. Autor niniejszej pracy na podstawie uzyskanych wyników doświadczalnych oraz zaprezentowanego w [4] algorytmu opracował kod programu pozwalający oszacować odporność na pęknięcie J_C , jeżeli znane są: charakterystyka materiału, geometria próbek oraz pary współrzędne punktów (da, J) . Z algorytmu podanego w normie [4] można oszacować odporność na pęknięcie wybranego materiału, jednakże wyniki uzyskane tą metodą nie są zadowalające – patrz tabl. III. Dla jednego przypadku nie dało się wyznaczyć wartości J_Q . Praktycznie dla każdej próbki uzyskano zupełnie inne wartości całki J_Q . Najbardziej zbliżone do siebie są wartości otrzymane dla grubości $B = 15$ mm – należy zaznaczyć, że uzyskane w oparciu o normę [4] wartości całki J_Q spełniają warunki gwarantujące dominację płaskiego stanu odkształcenia:

$$B, b \geq 25 \cdot \frac{J_Q}{R_e} \quad (2)$$

gdzie: $b = (W - a)$ jest to początkowa długość niepękniętego odcinka próbki, a B jest grubością próbki.

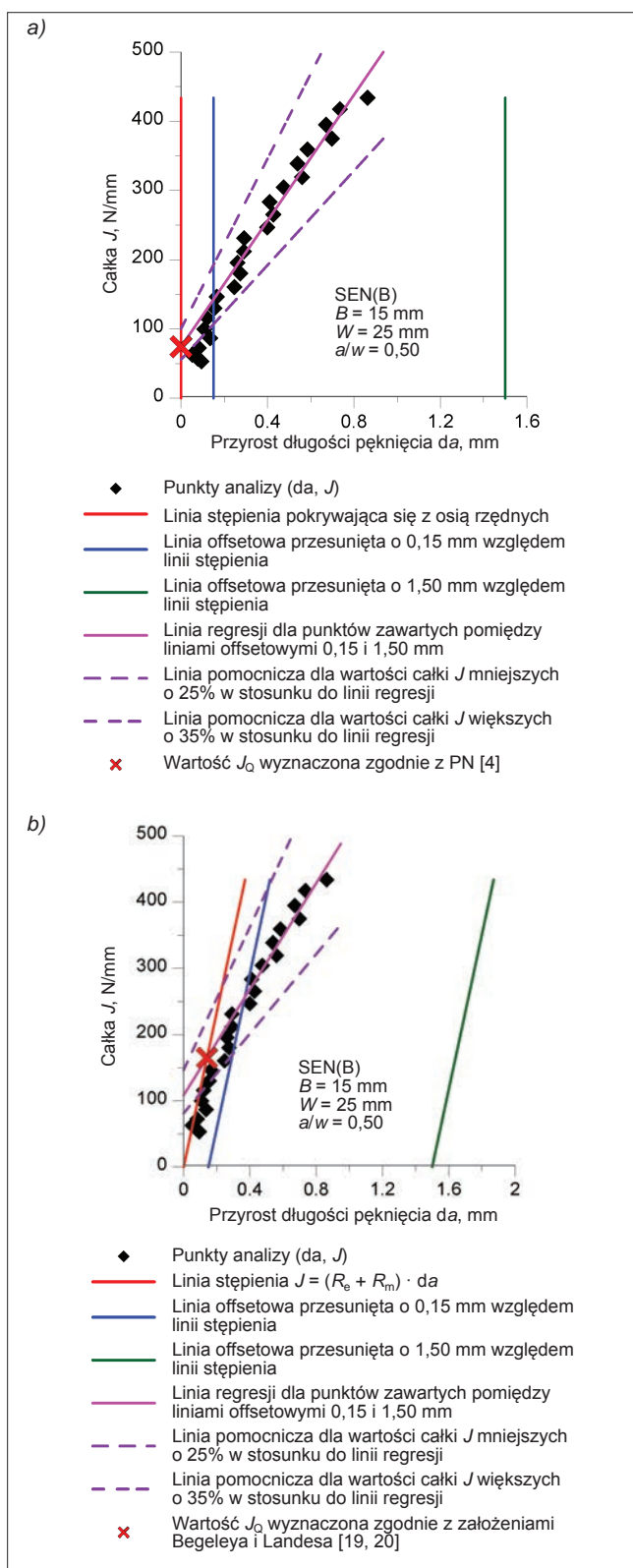
Również wszystkie wartości J_Q uzyskane dla próbek o grubości $B = 10$ mm gwarantują spełnienie warunków (2) i dominację płaskiego stanu odkształcenia. Tablica III zawiera tak-

TABLICA III. Doświadczalnie wyznaczone wartości całki $J - J_Q$ zgodnie z normą [4] oraz metodą zaproponowaną przez Begeleya i Landesa [19] dla stali 41Cr4 wykorzystanej w programie badawczym

		B = 5 mm			B = 10 mm			B = 15 mm		
		Nr próbki			Nr próbki			Nr próbki		
		5.1	5.2	5.3	10.1	10.2	10.3	15.1	15.2	15.3
Zgodnie z [4], J_Q jako przecięcie linii regresji z osią OY	J_Q , N/mm	328,71	199,17	225,74	68,24	45,74	54,65	77,35	–*	74,30
	$25 \times J_Q / R_e$, mm	17,79	10,78	12,22	3,69	2,48	2,96	4,18	–*	4,02
Zgodnie z pomysłem [19, 20] – metoda Begeleya i Landesa	J_Q , N/mm	410,28	532,72	475,68	195,64	–*	215,37	173,62	–*	164,94
	$25 \times J_Q / R_e$, mm	22,20	28,83	25,74	10,59	–*	11,65	9,39	–*	8,92

* Dla tej próbki nie jest możliwe wyznaczenie wartości J_Q – brak punktów pomiarowych we właściwym obszarze





Rys. 9. Graficzna prezentacja sposobu poszukiwania krytycznej wartości całki J według normy [4] (a) oraz metody Begeleya i Landesa [19, 20] (b) próbki SEN(B) o grubości $B = 15$ mm (próbka nr 5.3)

że wartości całki J_Q oszacowane metodą pierwotnie zaproponowaną przez Begeleya i Landesa w latach 1971–1974 [19, 20]. Analiza tego zestawienia wskazuje, że zastosowanie różnych metod daje różne wyniki – patrz tabl. III oraz rys. 9. Wyniki uzyskane metodą Begeleya i Landesa dla grubości $B = 15$ mm potwierdzają dominację płaskiego stanu odkształcenia, ponieważ wymiary geometryczne próbek (B oraz $b = W - a$) spełniają warunek (2).

Wnioski

Dla badanego materiału dwie różne normy [4 i 5] oraz trzecie podejście zaproponowane przez Begeleya i Landesa [19, 20], które jest podstawą normy [5], niejednoznacznie określają odporność na pękanie w postaci krytycznej wartości całki J . Według normy [5] przeprowadzone próby są nieważne, według drugiej normy [4] – wyniki dla tego materiału nie są miarodajne – podobne wnioski można wyciągnąć dla metody opisanej w [19, 20]. Zaprezentowana analiza dotyczyła materiału, o którym wcześniej nie wiadomo, jak się zachowuje – nie znano jego charakterystyki: granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, stopnia umocnienia, udurowienia czy nawet odporności na pękanie. Na wyniki z pewnością wpływ miała charakterystyka materiału – wyraźna granica plastyczności, co było powodem skokowego przyrostu długości pęknięcia.

Jednakże w przypadku szybkiej diagnozy inżynier nie będzie miał czasu na zastanowienie się, jaką procedurę wybrać do określenia odporności na pękanie. Z analizy wynika, że próbki stosowane do wyznaczania odporności na pękanie powinny mieć raczej większą grubość – dla rozpatrywanej stali 41Cr4 – co najmniej 20 ± 25 mm. Wtedy wyniki byłyby miarodajne, a wyznaczona wartość całki J_Q zapewniałaby dominację płaskiego stanu odkształcenia i mogłaby być uznawana za cechę materiału. Sugerować można zatem, by grubość próbki zbliżona była do grubości referencyjnej $B = 25$ mm, podawanej w procedurach [1, 2, 6] przy analizie MML (*maximum likelihood method*), dla której szacuje się odporność na pękanie K_{mat} . Ewentualny wzrost grubości próbki może być ograniczony możliwościami technicznymi wykorzystywanej w badaniach maszyny wytrzymałościowej. Innym rozwiązaniem jest rezygnacja z wyznaczania odporności na pękanie w formie krytycznych wartości całki J , współczynnika intensywności naprężeń czy rozwarcia wierzchołka pęknięcia. Zamiast tego można wyznaczyć udurowienie metodą Charpy'ego, a potem skorzystać ze wzorów empirycznych podanych w [1, 2, 6] i wyznaczyć referencyjną wartość odporności na pękanie $K_{J0,2}$ – charakterystyczną dla górnej gałęzi krzywej przejścia krucho-plastycznego, dla której z reguły obserwuje się ciągły mechanizm pęknięcia (jednostką będzie tu miano współczynnika intensywności naprężeń – $MPa \cdot m^{0,5}$), którą po przeliczeniu na jednostki całki J (czyli N/mm) można utożsamiać z wartością całki J odpowiadającą przyrostowi pęknięcia na poziomie 0,2 mm.

Celem pracy nie było przedstawienie dyskusji na temat metod wyznaczania doświadczalnie odporności na pękanie, nie jest to też próba obalenia którejś z metod lub podważania zapisów normatywnych [4, 5]. Starano się zasygnalizować, z jakimi problemami może się borykać inżynier, jeżeli wymagać się będzie od niego wyznaczenia tej cechy materiału. Zalecenia procedur FITNET [1, 2] sugerują, by projektowanie elementów konstrukcyjnych, ich wytwarzanie, a nawet eksploatacja odbywały się wraz z określaniem wytrzymałości i odporności na pękanie w przypadku pojawienia się różnych defektów. Jednakże bez odpowiednich parametrów materiałowych nie można wykorzystać zaleceń procedur [1, 2]. Na etapie projektowania można swobodnie dobrać materiały, a poprzez właściwą obróbkę sterować wartościami stałych materiałowych oraz wielkościami wykorzystywanymi do oceny odporności na pękanie. Jednak w przypadku analizy istniejącej konstrukcji, gdy nie ma informacji o materiale, szacowanie własności mechanicznych

i odporności na pękanie może sprawiać przedstawione w pracy problemy.

Można więc stwierdzić, że jakikolwiek program badawczy powinien być prowadzony zgodnie z zaleceniami dokumentów normatywnych [4, 5, 7, 13], ale niepowodzenie w trakcie pewnych prób i analiz nie jest jednoznaczne z brakiem możliwości oszacowania odporności na pękanie [1, 2] – zawsze bowiem znajdzie się jakieś rozwiązanie.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego IUVENTUS PLUS o numerze IP2012 011872, finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

1. FITNET Report (European Fitness-for-service Network). Ed. M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers. Contract No. G1RT-CT-2001-05071, 2006.
2. Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J. "The assessment of the strength and safety of the operation high temperature components containing crack". Kielce: Kielce University of Technology Publishing House, 2008.
3. PN-EN 1993 Eurokod 3: Konstrukcje stalowe.
4. PN-87/H-4335 Metale – Metoda badania odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
5. ASTM, 2005, ASTM E 1820-05 Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, American Society for Testing and Materials.
6. SINTAP: Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Final Procedure, Brite-Euram Project No. BE95-1426. Rotherham: British Steel, 1999.
7. PN-91/H-04310, Próba statyczna rozciągania metali.
8. Neimitz A., Dzioba I., Molasy R., Graba M. „Wpływ więzów na odporność na pękanie materiałów kruchych”. *Materiały XX Sympozjum Zmęczenia i Mechaniki Pękania*. Bydgoszcz–Pieczyska, 27–30 kwietnia 2004 r., s. 265–272.
9. Neimitz A., Dzioba I., Galkiewicz J., Molasy R. "A study of stable crack growth using experimental methods. Finite elements and fractography". *Engineering Fracture Mechanics*. 71 (2004): pp. 1325–1355.
10. www.ekspreststal.com.pl/stale-do-ulepszenia-cieplnego.html.
11. www.dostal.com.pl/stal-do-ulepszenia-cieplnego.html.
12. "Poradnik mechanika". Red. J. Potrykus. Wydawnictwo REA, 2009.
13. PN-EN ISO 6892-1, 1,1 ISO 6892-1 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.
14. Anderson T.L. "Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications". CRC Press, Corporate Blvd., N.W., Boca Raton, Florida (2000) 33431.
15. Neimitz A. „Mechanika pękania”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
16. Galkiewicz J., Lis Z., Molasy R., Neimitz A. „Mechanika doświadczalna. Laboratorium”. Kielce: Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 1999.
17. Sherry A.H., Wilkes M.A., Beardsmore D.W., Lidbury D.P.G. "Material constraint parameters for the assessment of shallow defects in structural components – Part I: Parameter solutions". *Engineering Fracture Mechanics*. 72 (2005): pp. 2373–2395.
18. Sherry A.H., Hooton D.G., Beardsmore D.W., Lidbury D.P.G. "Material constraint parameters for the assessment of shallow defects in structural components – Part II: Constraint – based assessment of shallow cracks". *Engineering Fracture Mechanics*. 72 (2005): pp. 2396–2415.
19. Landes J.D., Begley J.A. "The Effect of Specimen Geometry on JIC, Fracture Toughness". *Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics*. Part II, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, 1972, pp. 24–39.
20. Landes J.D., Begley J.A. "Test Results from J-Integral Studies: An Attempt to Establish a JIC Testing Procedure Fracture Analysis". ASTM STP 560. American Society for Testing and Materials, pp. 170–186. ■