

## RESEARCH OF THE RESISTANCE AGAINST THERMAL SHOCKS OF CHOSEN ELEMENTS OF COMBUSTION ENGINES

**Antoni Jankowski, Barbara Jankowska**

*Institute of Aeronautics*  
*Al. Krakowska 110/114, 02-256 Warszawa, Poland*  
*tel.: +48 22 8460011, fax: +48 22 8464432*  
*e-mail: ajank@ilot.edu.pl*

**Andrzej Ambrozik**

*Technical University of Kielce*  
*Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, Poland*  
*Tel.: +48 41 3424344 fax: +48 41 3424340, e-mail: silspal@tu.kielce.pl*

**Marcin Słezak**

*Motor Transport Institute*  
*ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warszawa, Poland*  
*tel.: +48 22 6753058, fax: +48 22 8110906*  
*e-mail: marcin.slezak@its.waw.pl*

### **Abstract**

*The problem the resistance of elements and sets of machines on thermal shocks appears in many domains of the technique, from computers across machines and metallurgic devices, combustion engines to space devices. The range and the level of thermal loads is diverse and dependent from working conditions, as well as the temperature range has to be adapted to real conditions in which the given element, set or stage works. Appear two kinds of loads which can be due by thermal shocks: expanding and compressive. Thermal shocks appear during heterogeneous warming or the cooling with reference to homogeneous materials, or homogeneous warming or the cooling of heterogeneous materials. They appear also during homogeneous warming of homogeneous materials about complicated configuration. Theoretical bases of thermal shocks, bases thermal shocks with the special attention on the different influence of thermal shocks with reference to materials fragile and plastic are presented in the article. Main factors influencing on the resistance of materials on thermal shocks are introduced. Also the apparatus and self-operated with computer controlling investigative devices which let on the realization of the cycle of research of thermal shocks in the range of the temperature to 1150 about C are described in the paper. The result of initial researches with reference to pistons of combustion engines which showed, in following cycles of thermal shocks takes place exchanges of measurements are submitted. As well the attention on essential influent parameters on the resistance of materials on thermal shocks to which one ought to accept among other things the coefficient of linear expansion and Young's modulus.*

## **BADANIA ODPORNOŚCI NA SZOKI TERMICZNE WYBRANYCH ELEMENTÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH**

### **Streszczenie**

*Problem odporności elementów i zespołów maszyn na szoki termiczne występuje w wielu dziedzinach techniki, od komputerów poprzez maszyny i urządzenia hutnicze, silniki spalinowe do urządzeń kosmicznych. Zakres i poziom obciążeń termicznych jest zróżnicowany i zależy od warunków pracy, jak również zakres temperatur musi być dostosowany do warunków rzeczywistych, w których dany element, zespół czy urządzenie pracuje. Występują dwa rodzaje obciążeń, które mogą być spowodowane przez szoki termiczne: rozciągające i ściskające. Szoki termiczne występują w czasie niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia w odniesieniu do*

*jednorodnych materiałów, albo jednorodnego nagrzewania lub chłodzenia niejednorodnych materiałów. Występują także w czasie jednorodnego nagrzewania materiałów jednorodnych o złożonej konfiguracji. W artykule zaprezentowano podstawy teoretyczne szoków termicznych, przy czym zwrócono szczególną uwagę na różne oddziaływanie szoków termicznych w odniesieniu do materiałów kruchych i plastycznych. Przedstawiono główne czynniki wpływające na odporność materiałów na szoki termiczne. Przedstawiono też aparaturę i automatyczne, sterowane komputerem urządzenia badawcze, które pozwalają na realizację cyklu badań szoków termicznych w zakresie temperatury do 1150 °C. Przedstawiono wynik wstępnych badań w odniesieniu do tłoków silników spalinowych, które wykazały, że w kolejnych cyklach szoków termicznych ma miejsce zmiany wymiarów. Zwrócono też uwagę na istotne parametry wpływające na odporność materiałów na szoki termiczne, do których należy zaliczyć między innymi współczynnik rozszerzalności liniowej i moduł Younga.*

## **1. Wstęp**

Problem odporności elementów i zespołów maszyn na szoki termiczne występuje w wielu dziedzinach techniki, od komputerów poprzez maszyny i urządzenia hutnicze, silniki spalinowe do urządzeń kosmicznych. Zakres i poziom obciążeń termicznych jest zróżnicowany i zależy od warunków pracy, jak również zakres temperatur musi być dostosowany do warunków rzeczywistych, w których dany element, zespół czy urządzenie pracuje. Będą to więc temperatury od ujemnych, zbliżonych do temperatury zera absolutnego do temperatury kilku tysięcy stopni Celsjusza odnoszących się do elementów i urządzeń nuklearnych, komór spalania i dysz silników lotniczych i raketowych, pokryć pojazdów kosmicznych, elementów pieców przemysłowych i urządzeń hutniczych.. Obok temperatury czynnikiem decydującym o trwałości i niezawodności urządzeń pracujących w warunkach szoków termicznych istotny jest czas przebywania w warunkach wysokich lub niskich temperatur oraz warunki wymiany ciepła.

Szoki termiczne są przyczyną wysokich gradientów temperatury występujących w materiale, co z kolei prowadzi do wysokich naprężeń występujących nawet przy braku obciążeń mechanicznych, co przyspiesza uszkodzenie. W odniesieniu do elementów niejednorodnych, bimetalowych oraz z materiałów z pokryciami gradienty temperatury będą jeszcze większe, co jest spowodowane różnymi charakterystykami materiałów, a więc problem szoków termicznych w odniesieniu do takich elementów będzie jeszcze bardziej istotny. Tak więc szoki termiczne odnoszą się zarówno do niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia elementów jednorodnych, jak i jednorodnego nagrzewania lub chłodzenia materiałów niejednorodnych (bimetalowych lub z pokryciami). Zatem jeżeli rozważyć sytuację, że materiał jest ogrzewany i nie może się wystarczająco wydłużyć z powodu oddziaływania drugiego materiału, gdy temperatura wzrasta, to występują obciążenia termiczne i w jednym materiale wystąpią naprężenia rozciągające, w drugim – ściskające. Biorąc pod uwagę różne współczynniki rozszerzalności liniowej materiałów (przykładowo: stal węglowa –  $5,8 \times 10^{-6}$ , stal nierdzewna –  $9,6 \times 10^{-6}$ , aluminium –  $13,3 \times 10^{-6}$ , miedź –  $9,3 \times 10^{-6}$ , silumin –  $26 \times 10^{-6}$ ) można stwierdzić, że podgrzanie połączenia dwu materiałów o krańcowych współczynnikach rozszerzalności liniowej (stal węglowa – silumin) prowadzi do przekroczenia granicy wytrzymałości i do uszkodzenia elementu konstrukcyjnego albo już przy pierwszym nagrzewaniu, albo w wyniku kolejnych nagrzewania, gdy wystąpią uszkodzenia zmęczeniowe. Należy zaznaczyć, że nawet w odniesieniu do jednorodnego materiału i jednorodnego grzania lub chłodzenia mogą wystąpić naprężenia termiczne z powodu złożonego kształtu elementu konstrukcyjnego pracującego w warunkach wysokich temperatur.

Reasumując, występują dwa rodzaje obciążeń, które mogą być spowodowane przez szoki termiczne: rozciągające i ściskające. Szoki termiczne występują w czasie niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia w odniesieniu do jednorodnych materiałów, albo jednorodnego nagrzewania lub chłodzenia niejednorodnych materiałów. Przeciwdziałanie negatywnym skutkom szoków termicznych polega między innymi na ograniczeniu prędkości nagrzewania i

chłodzenia, oraz ograniczenia zakresu temperatury. Należy podkreślić, że skutki szoków termicznych są podobne do skutków zmęczenia materiałów spowodowanych zmiennymi obciążeniami mechanicznymi.

Szczególne niekorzystna sytuacja ma miejsce, gdy wraz z obciążeniami termicznymi oddziałują obciążenia mechaniczne, np. siły ciśnienia (komora spalania, reaktory nuklearne, zbiorniki) czy bezwładności (łopatki turbin, tłoki silników i sprężarek, wirniki turbin). Wpływ obciążeń mechanicznych dodatkowo zwiększa wpływ szoków termicznych. Łączne oddziaływanie obu rodzajów obciążeń termicznych i mechanicznych istotnie zwiększa prawdopodobieństwo uszkodzenia wysoko obciążonych elementów urządzeń.

## 2. Naprężenia termiczne a szoki termiczne

Gdy element jest poddawany gradientowi temperatury albo gdy element złożony składający się z dwu lub więcej materiałów mających różne współczynniki rozszerzalności liniowej jest nagrzewany w sposób jednolity lub niejednolity, to następują naprężenia z powodu różnej rozszerzalności poszczególnych fragmentów. Występuje tu przeważnie zachowanie ciągłości niż jej utrata, co skutkuje wystąpieniem naprężeń. Jeżeli element nie wytrzyma naprężeń, to ma miejsce utrata ciągłości i jego uszkodzenie.

Występuje zasadnicza różnica w zachowaniu się materiałów kruchych i plastycznych. Materiały kruche są odporne tylko na niewielkie zmiany odkształceń i przy przekroczeniu wartości granicznych może nastąpić uszkodzenie elementu. Materiały plastyczne z kolei mogą wytrzymywać znacznie większe odkształcenia. W związku z tym, że odporność materiałów kruchych na obciążenia termiczne zależy od zdolności materiału do pochłaniania wprowadzanych odkształceń, to utrzymanie ciągłości elementu konstrukcyjnego w rezultacie wprowadzenia gradientu temperatury w niektórych sytuacjach nie będzie możliwe i nastąpi uszkodzenie elementu.

Materiały plastyczne, z drugiej strony, mogą zwykle oprzeć się tym dodatkowym odkształceniom, ale jeżeli wystąpi duża liczba powtórzeń szoków termicznych, to może wystąpić uszkodzenie zmęczeniowe.

Problem naprężeń cieplnych ma duże znaczenie w odniesieniu do wysoko obciążonych silników spalinowych. Obecne konstrukcje silników wymagają większej odporności na wysokie temperatury oraz użycia materiałów odpornych na działanie wysokich temperatur. Jednak jest jedna zasadnicza cecha tych materiałów, to brak plastyczności. Z tego powodu, naprężenia termiczne są jednym z najbardziej istotnych kryteriów branych pod uwagę w stosowaniu tych materiałów. Jednak naprężenia termiczne mają też istotne znaczenia w odniesieniu do materiałów plastycznych i występujące uszkodzenia tych materiałów można przypisać występującym szokom termicznym. Problematyka konstrukcji naddźwiękowych samolotów, gdzie występują gradienty temperatury związane z nagrzewaniem elementów zewnętrznych i uszkodzeń w nich występujących jest przykładem oddziaływania szoków termicznych w odniesieniu do konstrukcji, gdzie są stosowane materiały plastyczne. To samo dotyczy oczywiście promów kosmicznych.

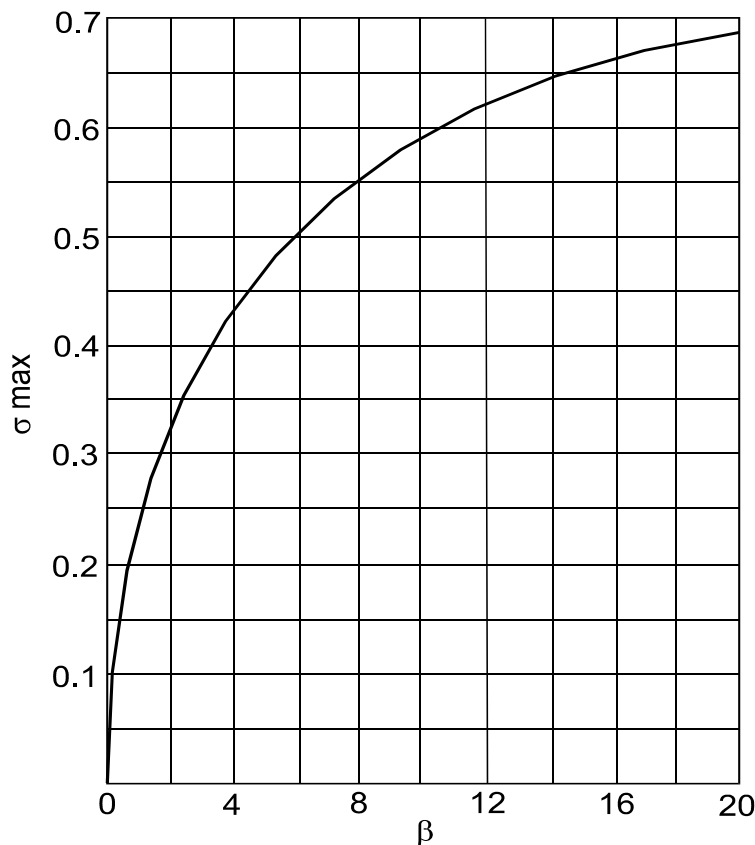
Należy zaznaczyć, że naprężenia termiczne należy odróżnić od szoków termicznych. W odniesieniu do szoków termicznych naprężenia cieplne są wywoływane przez szybkozmienną gradienty temperatury, zazwyczaj są to działania natychmiastowe (uderzenie). Na przykład, jeżeli ciało pierwotnie o stałej równomiernie rozłożonej temperaturze jest nagle zanurzone w ośrodku o innej temperaturze, to wprowadzany jest efekt szoku termicznego. W dowolnej chwili naprężenia są określane przez rozkład temperatury. Ale gradienty temperatury, które występują w stanie przejściowym są na ogół dużo wyższe niż te, które występują w stanie ustalonym i dlatego szoki termiczne są tak istotne z powodu występowania znacznie wyższych naprężeń w odniesieniu do zwykłych naprężeń termicznych.

Innym czynnikiem odróżniającym naprężenia termiczne od szoków termicznych jest prędkość narastania naprężeń, która jest bardzo duża w odniesieniu do szoków termicznych i wiele materiałów, które są poddane tej dużej prędkości wprowadzania naprężeń nie mogą tych naprężeń absorbować. Dlatego też niektóre kruche materiały przez szybkie wprowadzanie naprężeń nie mogą ich absorbować bez uszkodzenia w rezultacie szoków termicznych realizowanych z dużą prędkością, które, jeżeli byłyby wprowadzane powoli, mogłyby zostać absorbowane.

Jest też niezbędne odróżnienie pojedynczego cyklu szoku termicznego powodującego naprężenia termiczne od zmęczenia termicznego. Kiedy uszkodzenie jest spowodowane przez realizację kilku podobnych cykli naprężeń termicznych, a nie przez pojedynczy cykl to, proces ten ma odniesienie w zmęczenie termicznego. Procesy, które mają miejsce w elemencie w kolejnych cyklach występowania naprężeń są nadzwyczaj złożone, a mechanizm prowadzący do takiego uszkodzenia jest, jak dotychczas, niewyjaśniony.

### 3. Istota problemu szoków termicznych

Wielkość naprężeń termicznych zależy, obok temperatury, od wielkości strumienia ciepła i od czasu działania strumienia ciepła na element konstrukcyjny, przy czym moment wystąpienia maksymalnych naprężeń występuje tym wcześniej im strumień ciepła jest większy. Ponadto obserwuje się różne oddziaływanie pojedynczego szoku termicznego i cyklicznego oddziaływania powtarzających się szoków termicznych. Przykładowe maksymalne bezwymiarowe naprężenia w funkcji bezwymiarowego strumienia ciepła przedstawia Rys. 1, przy czym maksymalne naprężenie bezwymiarowe jest stosunkiem naprężenia termicznego występującego w elemencie poddanym działaniu temperatury do naprężenia, gdy rozszerzalność termiczna danego elementu jest całkowicie zablokowana.



Rys. 1. Zależność bezwymiarowych naprężeń termicznych  $\sigma_{max}$  od bezwymiarowego strumienia ciepła  $\beta$   
 Fig. 2. The dependence of un dimensional thermal tensions of  $\sigma_{max}$  from the unidimensional heat stream of  $\beta$

Z wykresu przedstawionego na rys. 1 wynika, że zmiana maksymalnego naprężenia jest prawie liniowa w odniesieniu do małych wartości strumienia ciepła i asymptotycznie dąży do jedności w odniesieniu do dużych wartości strumienia ciepła. Generalnie bezwymiarowe naprężenie termiczne  $\sigma$  może być wyrażone zależnością:

$$\sigma = \frac{\sigma_o(1 - \mu)}{E\alpha(T - T_o)}, \quad (1)$$

gdzie:

- $\sigma_o$  – naprężenie początkowe,
- $\mu$  – współczynnik Poissona,
- $E$  – moduł Younga,
- $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności liniowej,
- $T$  – temperatura w punkcie naprężeń,
- $T_o$  – temperatura odniesienia.

Problematyka szoków termicznych jest przedmiotem badań zarówno teoretycznych, jak i eksperymentalnych. Stan wiedzy w przedmiocie omawianej problematyki jest niezwykle obszerny i przedstawiony jest w publikacjach [1 - 25].

Proponowana metodyka badań oparta jest o unikalne urządzenia badawcze, aparaturę pomiarową pozwalającą na pomiary naprężeń w zakresie wysokich temperatur, oraz zaawansowaną symulację komputerową opartą o metodę elementów skończonych i oprogramowanie ANSYS.

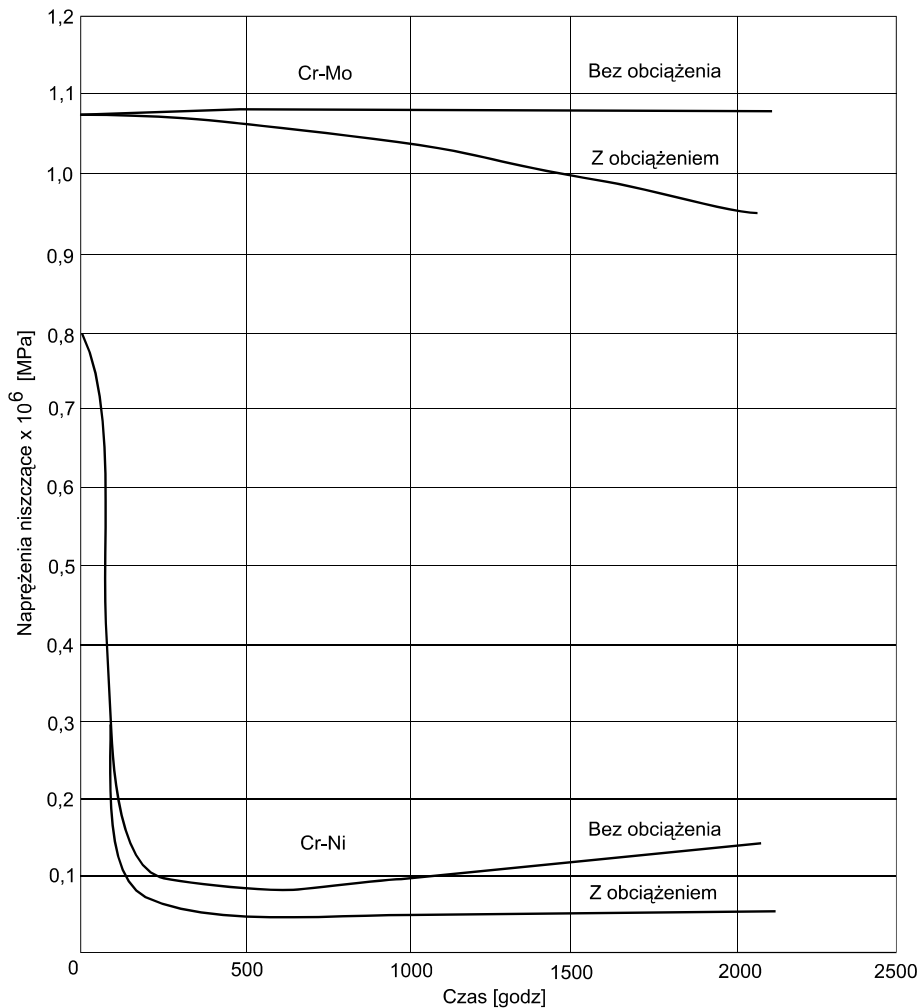
Na rys. 2 przedstawiono przykładowe dane literaturowe wpływu zmiany naprężeń niszczących w funkcji czasu starzenia w temperaturze 500 °C, przy poddaniu próbki dodatkowym naprężeniem wynoszącym 100 MPa oraz dla porównania bez dodatkowych obciążeń w odniesieniu do dwu materiałów odpornych na działanie wysokich temperatur.

Rys. 3 przedstawia przykład wpływu zmian ziarnistości materiału przypadający na jeden szok termiczny w odniesieniu do materiału tłoka wykonanego z siluminu okołeutektycznego. Rys. 4 przedstawia przykład wpływ liczby szoków termicznych na deformację próbki elementu tłoka wykonanego z siluminu okołeutektycznego. Warunki badań, z powodu ich laboratoryjnej realizacji, odbiegają od rzeczywistych w odniesieniu do czasu przebywania próbki w wysokiej temperaturze 360 °C. Należy podkreślić, że warunki występujące w silniku nie są tak drastycznie krańcowe, jak w przeprowadzonych badaniach próbek.

#### 4. Zagadnienia praktyczne

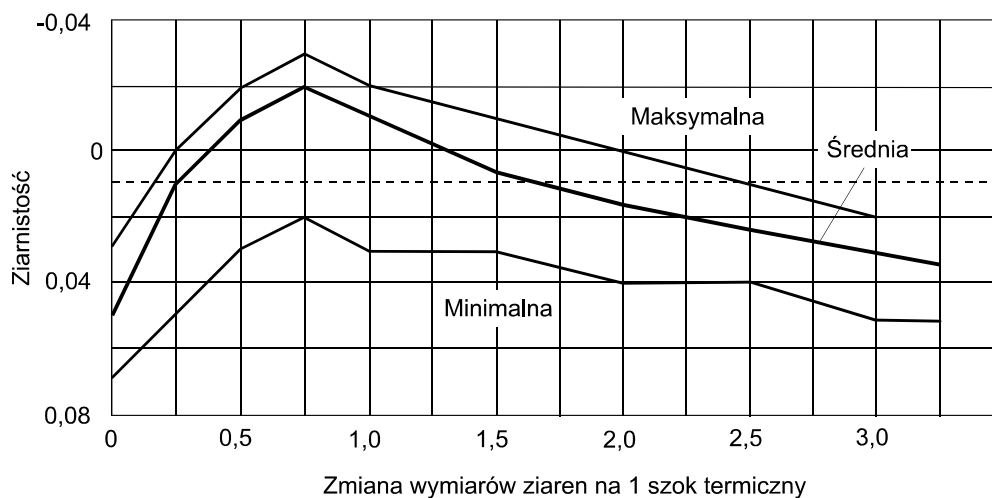
Złożona natura zjawiska szoków termicznych, w szczególności dotyczy materiałów plastycznych stosowanych na konstrukcje wielu urządzeń. Jest więc wskazane zwrócenie uwagi na kilka z aspektów tego problemu, który jest istotny z praktycznego punktu widzenia.

W materiałach kruchych koncentracja naprężeń jest zwykle kontrolująca i prowadzi do uszkodzenia. Dlatego koncentracja naprężeń ma zdecydowanie największe znaczenie w badaniach szoków termicznych w odniesieniu do materiałów kruchych. W odniesieniu do tych materiałów, koncentracja naprężeń nie ma tak istotnego znaczenia dla pojedynczego obciążenia, ale ma istotne znaczenie, gdy obciążenie jest stosowane cyklicznie. Uszkodzenie termiczne w materiałach plastycznych występuje na ogół po kilku szokach termicznych. Dlatego też koncentracja naprężeń ma też duże znaczenie w odniesieniu do materiałów plastycznych. Jest to szczególnie dobrze widoczne w odniesieniu do takich materiałów, w których budowa metalurgiczna materiału jest ściśle zależna od miejscowego odkształcenia plastycznego.



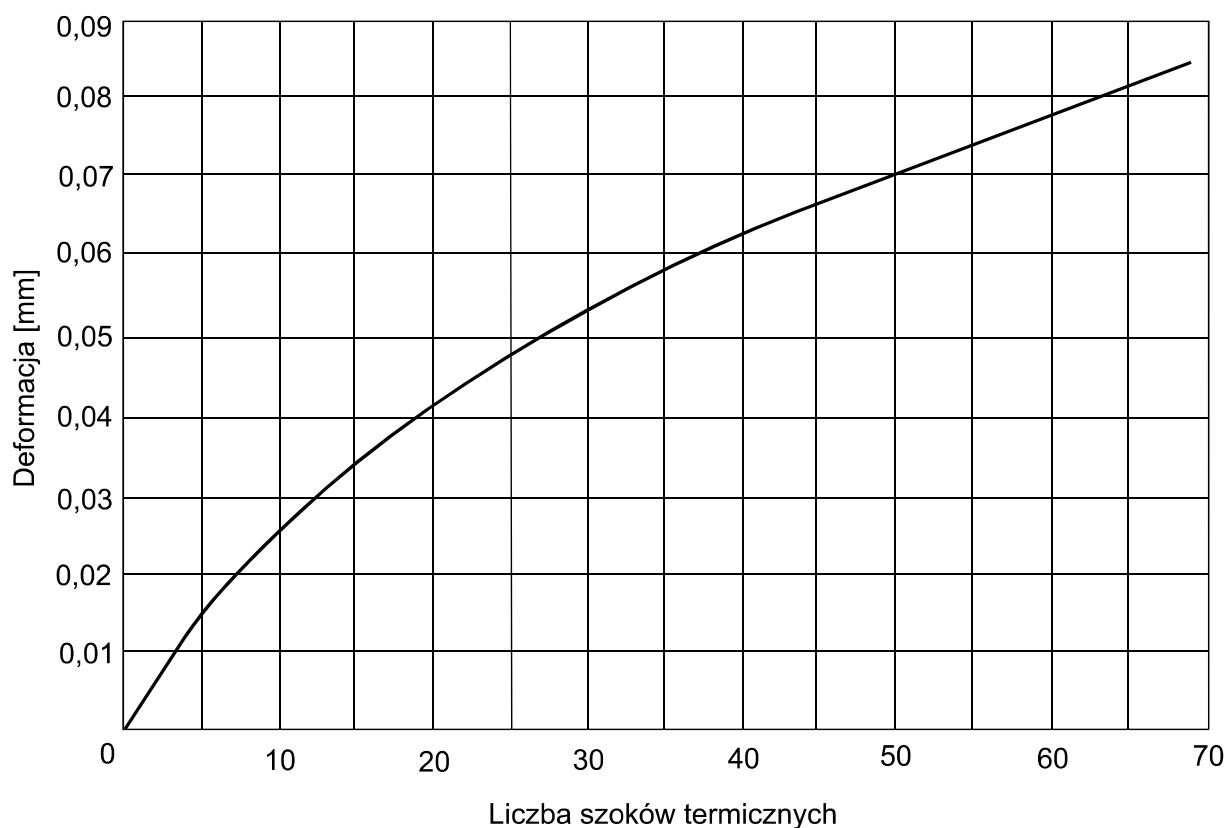
Rys. 2. Napężenia niszczące w funkcji czasu starzenia w temperaturze  $500^{\circ}\text{C}$  przy występowaniu dodatkowych obciążeń (100 MPa) i bez dodatkowych obciążeń w odniesieniu do dwu materiałów odpornych na działanie wysokich temperatur

Fig. 2. Failure stress in the function of the time of the senescence at the temperature  $500^{\circ}\text{C}$  at the occurrence of additional stress (100 MPa) and without additional stress with reference to two resistant materials on the operation of high temperatures



Rys. 3. Przykład wpływu zmian ziarnistości materiału w czasie jednego szoku termicznego w odniesieniu do tłoka silnika spalinowego

Fig. 3. The example of the influence of changes of the material grains during one thermal shock with reference to piston of the combustion engine



Rys. 4. Przykład wpływu liczby szoków termicznych na deformację próbki tłoka  
 Fig. 4. The example of the influence of the number of thermal shocks on the deformation of the piston sample

Bardzo istotny wpływ ma przewodnictwo cieplne w odporności na szoki termiczne w odniesieniu do materiałów kruchych.

Zależność (2) przedstawia wpływ podstawowych parametrów na odporność na szoki termiczne:

$$\Theta = \frac{kt}{\rho c h^2}, \quad (2)$$

gdzie:

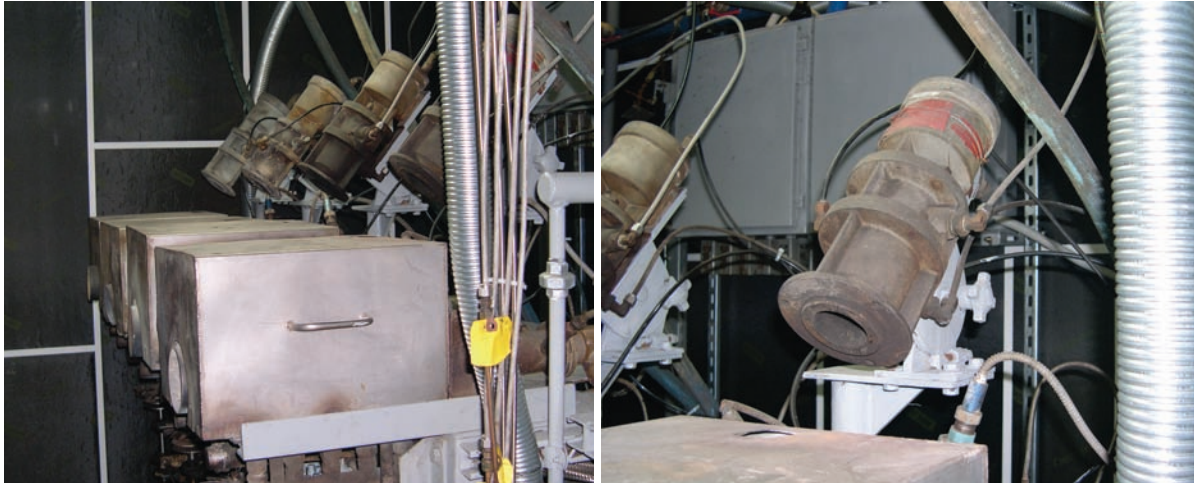
- $\theta$  – czas bezwymiarowy,
- $k$  – współczynnik przewodności cieplnej,
- $t$  – czas,
- $\rho$  – gęstość,
- $c$  – ciepło właściwe,
- $h$  – połowa grubości płyty.

Z innych parametrów oddziałujących na odporność na szoki termiczne należy oczywiście wymienić współczynnik rozszerzalności termicznej. W odniesieniu do materiałów kruchych odporność ta jest odwrotnie proporcjonalna do współczynnika rozszerzalności termicznej. To samo odnosi się także do materiałów plastycznych. Tak więc każde zmniejszenie współczynnika rozszerzalności termicznej poprawia odporność materiału na szoki termiczne. Dlatego poszukiwania nowych materiałów uwzględniają zmniejszenie tego współczynnika. Pewne kompozycje materiałów mogą wykazywać nawet ujemne wartości tego współczynnika. Tak więc materiały o zerowym współczynniku rozszerzalności termicznej będą idealnymi materiałami z punktu widzenia odporności elementów materiałów na szoki

termiczne w odniesieniu do materiałów kruchych. Innym parametrem wpływającym na odporność na szoki termiczne jest moduł Younga. Tak więc materiały z niskimi wartościami tego modułu są bardziej odporne na szoki termiczne. W odniesieniu do materiałów plastycznych wpływ modułu Younga nie jest tak istotny jak w odniesieniu do materiałów kruchych.

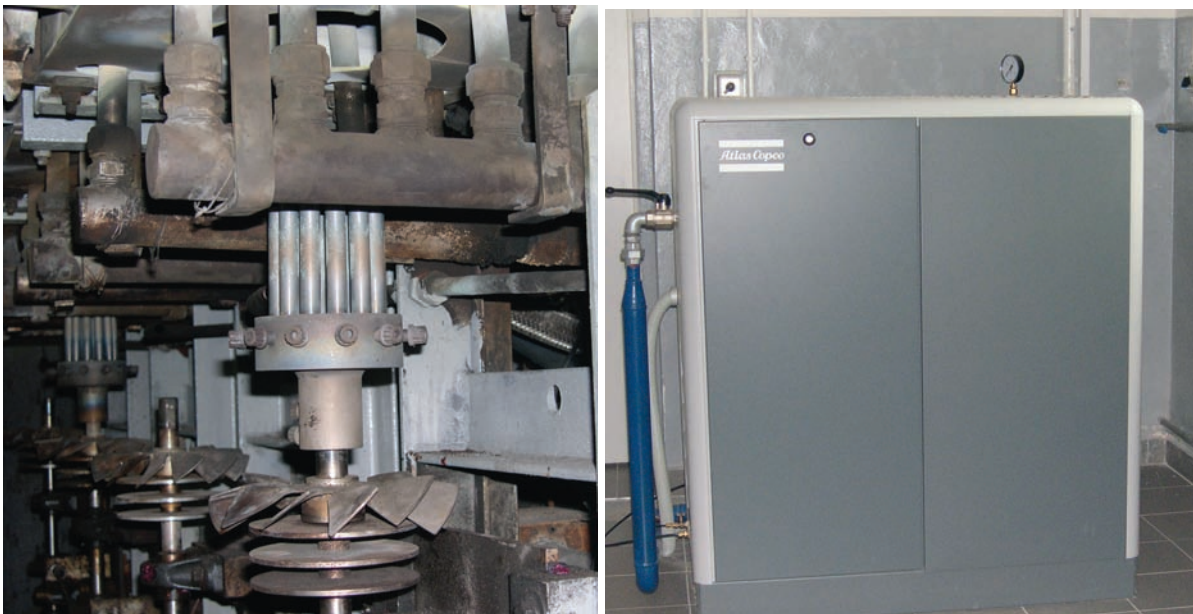
## 5. Propozycje badań

Widok urządzenia do realizacji badań szoków termicznych przedstawia Rys. 5 i 6.



*Rys. 5. Widok urządzeń do realizacji szoków termicznych: z lewej 4 komory spalania, z prawej urządzenie termowizyjne*

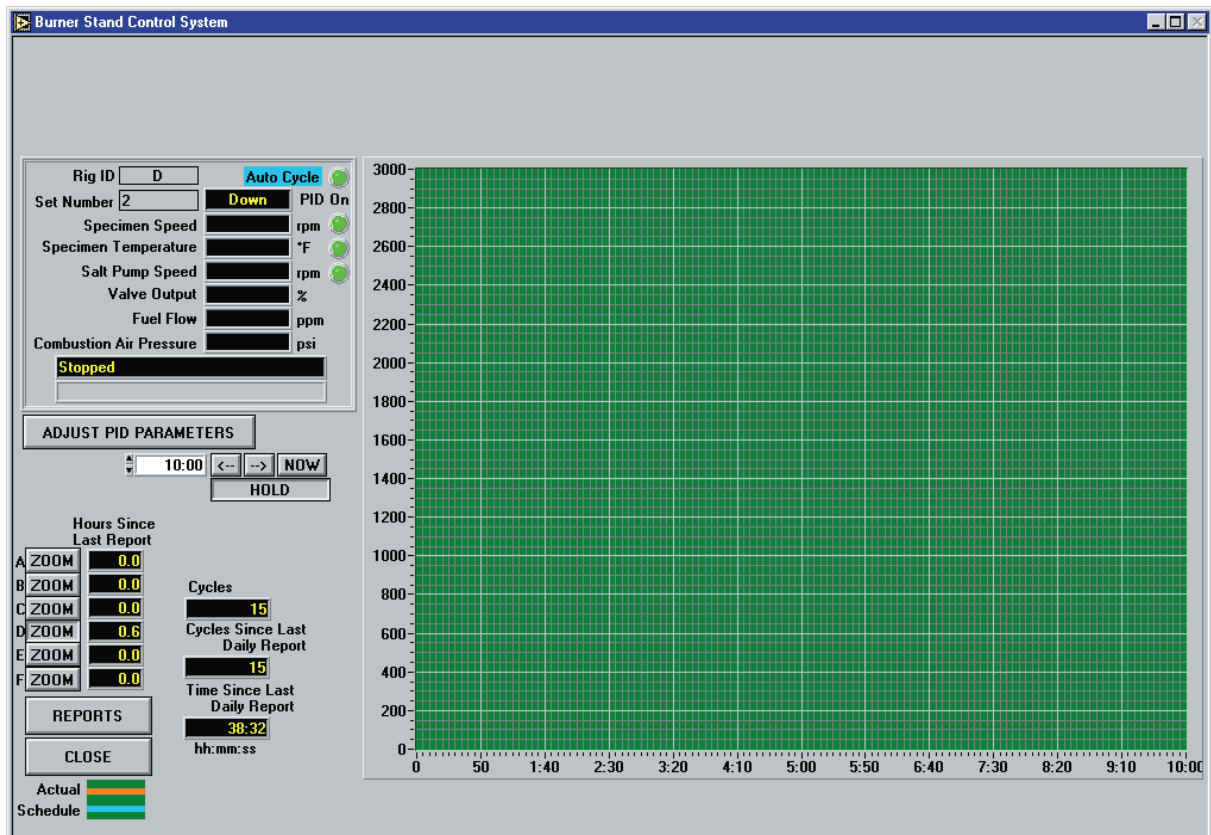
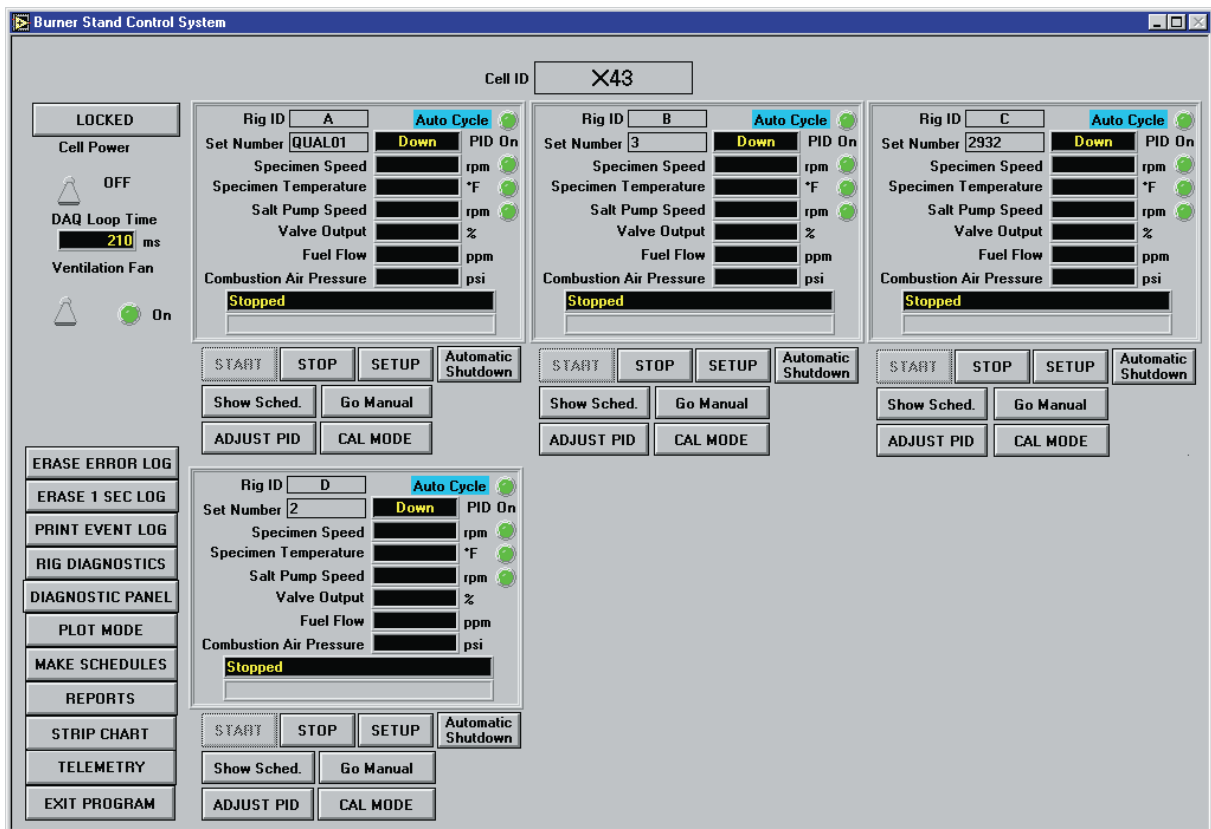
*Fig. 5. The view of devices to the realization of thermal shocks: on the left - 4 combustion spaces, on the right the thermo vision device*



*Rys. 6. Widok automatycznego sterowanego komputerem urządzenia do realizacji grzanie i chłodzenia, z prawej sprężarka*

*Fig. 6. The view of automatic computer controlled device to the realization the heating and cooling, on the right - the air-compressor*





Rys. 7. Widok karty pomiarowej nastaw i zapisu temperatury kontrolowanej komputerem w czasie realizacji badań

Fig. 7. The view of the measuring- card set and the recording of the temperature controlled with the computer during research

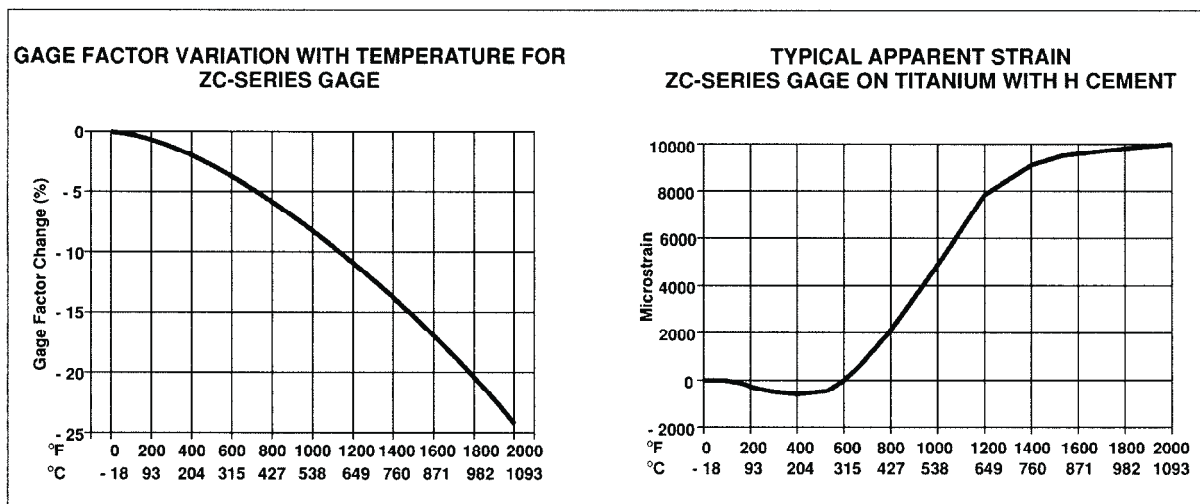
Rys. 7. przedstawia nastawy procesu szoków termicznych i kontrolę zapisu temperatury w czasie badań.

Stoisko badawcze jest całkowicie zautomatyzowane i sterowane specjalistycznym programem komputerowym, co pozwala na utrzymanie jednakowej i powtarzalnej temperatury niezbędnej do realizacji badań. Temperatura w komorze uzyskiwana jest poprzez spalanie paliwa lotniczego JetA1. Próbki są ogrzewane w strumieniu gazów spalinowych, a następnie chłodzone sprężonym powietrzem również przez zadany czas. Temperatura próbek kontrolowana jest przez kamerę termowizyjną i utrzymywana z dokładnością  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ . Praca stoiska sterowana jest przez komputerowy system kontroli, który utrzymuje założoną temperaturę próbek i prędkość obrotową systemu mocowania próbek oraz steruje czasem grzania i chłodzenia.

Widok tensometru przewidzianego do badań szoków termicznych przedstawiony jest na Rys.8., a niektóre charakterystyki temperaturowe, jak stała tensometru w funkcji temperatury i wydłużenie w funkcji temperatury – na Rys. 9. Badania odkształceń i naprężeń będą realizowane z kompensacją temperatury, ale niektóre porównawcze badania będą realizowane bez kompensacji, ze względów oszczędnościowych.



Rys. 8. Widok wysokotemperaturowego ( $1150^{\circ}\text{C}$ ) tensometru do badań szoków termicznych  
Fig. 8. The view of the high-temperature ( $1150^{\circ}\text{C}$ ) strain gage to research of thermal shocks



Rys. 9. Niektóre charakterystyki tensometrów przewidzianych do badań szoków termicznych w funkcji temperatury

Fig. 9. Some characterizations of strain gages provided for to research of thermal shocks in the function of the temperature

W proponowanych badaniach będą wykonywane pomiary temperatury w różnych miejscach badanych elementów oraz odkształceń za pomocą specjalnych tensometrów pozwalających na prowadzenie pomiarów w warunkach wysokich temperatur. Uzyskane dane z pomiarów będą stanowić punkt wyjścia do zaawansowanej analizy metodą elementów skończonych przy wykorzystaniu systemu komputerowego ANSYS, który wyróżnia się na tle innych systemów obliczeniowych, jak ABAQUS, ALGOR, FLUENT, czy NASTRAN. System ANSYS zostanie wykorzystany głównie do określenia pola temperatury w warunkach szoków termicznych i generalnie dla sytuacji dwu materiałów, z których jeden poddawany jest naprężeniom ściskającym, a drugi rozciągającym.

Dalszym efektem prac będzie modyfikacja metod badawczych w odniesieniu do badań szoków termicznych w warunkach wysokich temperatur, nowych rozwiązań materiałowych na pokrycia i podłoże w odniesieniu do wysoko obciążonych elementów maszyn o zwiększonej odporności na szoki termiczne.

W rezultacie badań i analizy symulacyjnej zostaną wytypowane zestawy pokryć i podłoża o zwiększonej odporności na szoki termiczne. Zakres zastosowań proponowanych badań jest niezwykle szeroki i obejmuje takie dziedziny nauki i techniki, jak silniki spalinowe, piece przemysłowe, sprężarki, turbiny, komory spalania i palniki, urządzenia energetyczne i metalurgiczne, przemysł chemiczny.

## 6. Wnioski

Odporność na szoki termiczne elementów konstrukcyjnych silników spalinowych zależy w sposób istotny od właściwości materiału, z którego dany element jest wykonany, głównie od tego czy dany materiał zalicza się do kategorii materiałów kruchych, czy plastycznych.

Do innych parametrów wpływających na odporność na szoki termiczne należy zaliczyć rozszerzalność termiczną, który to parametr w sposób istotny wpływa zarówno na odporność materiałów kruchych, jak i plastycznych.

Moduł Younga wpływa w sposób bardziej istotny na odporność na szoki termiczne materiałów kruchych, z tym, że jego zmniejszenie korzystnie wpływa na tę odporność.

Szoki termiczne występują w czasie niejednorodnego nagrzewania lub chłodzenia w odniesieniu do jednorodnych materiałów, albo jednorodnego nagrzewania lub chłodzenia niejednorodnych materiałów. Występują także w czasie jednorodnego nagrzewania materiałów jednorodnych o złożonej konfiguracji.

Kryterium odporności na szoki termiczne w odniesieniu do materiałów kruchych jest różnica temperatury, przy której następuje zniszczenie materiału w czasie jednego cyklu. Drugim kryterium może być graniczna liczba cykli termicznych w zakresie ustalonych różnic temperatury do zniszczenia zmęczeniowego.

W większości wypadków szok termiczny może być ulepszony przez wzrosty w przewodnictwie. To powinno też być uwydatnione, że formuły mają zastosowanie tylko do nieskończonej płaskiej płyty, ale podobne formuły mogłyby prawdopodobnie być wyprowadzone tą samą metodą dla innych przypadków pociągających za sobą jednowymiarowe przenikanie ciepła. Podobnie, to powinno być uwydatnione, że formuły są odpowiednie tylko, kiedy czas trwania szoku występuje wystarczająco długo, żeby maksymalne naprężenie zostało uzyskane. Kiedy czas trwania szoku jest mały, to kryteria nie mają zastosowania. W odniesieniu do tłoków silników spalinowych czas trwania szoku jest krótki i z różnych względów lepszą odporność na szoki termiczne mają materiały na bazie stopów aluminium niż stopy żeliwa.

Kryterium dla materiałów plastycznych pojedynczego cyklu szoku termicznego nie jest uzasadnione, ponieważ uszkodzenie może nie wystąpić w jednym cyklu. Zastosowanie kryterium wielokrotnego cyklu do materiałów plastycznych też nie jest właściwe, ponieważ procesy metalurgiczne zachodzące podczas i między cyklami szoków termicznych zniekształcają obraz. Wobec istotnego znaczenia procesów metalurgicznych i istotnego wpływu temperatury na te procesy, prowadzenie testów w warunkach odbiegających od warunków rzeczywistych może być źródłem błędów. Należy podkreślić, że szczególnie zwiększanie temperatury w celu przyspieszenia wystąpienia uszkodzenia może wprowadzić niepożądane efekty metalurgiczne, które zniekształcać będą wyniki, które nie będą korespondować z warunkami pracy elementu. Dlatego jest bardzo istotne, żeby testy symulujące warunki eksploatacyjne niezależnie od tego czy to pociąga za sobą większą ich liczbę zanim uszkodzenie wystąpi nie były przyspieszane poprzez zwiększanie temperatury.

Zaprezentowano pewną liczbę istotnych parametrów, które mogą wpływać na poprawę odporności na szoki termiczne. Realizowane prace powinny być nakierowane na zmniejszenie koncentracji naprężeń oraz minimalizowanie ograniczeń w swobodnym wydłużaniu elementu, a także, co jest niezwykle istotne, na wprowadzenie korzystnych naprężeń początkowych, jak również pokryć ochronnych. Zwracać także należy uwagę na możliwość wystąpienia przemian fazowych, które mogą wystąpić w zakresie temperatur, w którym dany element konstrukcyjny pracuje. Kolejnym bardzo istotnym czynnikiem jest czas przebywania elementu konstrukcyjnego w podwyższonej temperaturze.

## Literatura

- [1] Barabash V., Federici G., Linke J. and Wu C. H., *Material/plasma surface interaction issues following neutron damage*, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 42-51, 2003.
- [2] Bolt H., Duwe R., Linke J., Ovchinnikov I., Rodig M., You J. H., *Composite materials for plasma exposed components of thermonuclear fusion devices*, Proc. of the Int. Symp. on Material Chemistry in Nuclear Environment, Tsukuba, Japan, pp. 265 – 275, 1996.
- [3] Cappariello A., D'Auria F., Galassi G. M., *Application of the Relap5/mod3.2 to the Analysis of the Reactor Pressure Vessel PTS - International Comparative Assessment Study*, University of Pisa Report, DCMN - NT 320(97), Pisa (I), 1997.

- [4] Choudhary B. K., Roedig M., Mannan S. L., *Influence of Temperature and Environment on Creep Crack Growth Behaviour of Alloy 800*, Trans. Indian Inst. Met., 49, pp. 573-580, 1996.
- [5] Deschka S., Schweizer S., Streibl B., ASDEX-Upgrade Team, Garcia-Rosales C., Hofmann G., Linke J., *Divertor II plasma facing components for ASDEX upgrade*" Proc. 19<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, Lissabon, 16.-20.09.1996., 455.
- [6] Hirai T., Philipps V., Huber A., Rubel M., Tanabe T., Wada M., Ohgo T., Ohya K., Pospieszczyk A., Sergienko G., Wienhold P., *Testing of tungsten and tantalum limiters to TEXTOR edge plasma: Material performance and deuterium retention*, Physica Scripta, T103, 63-67, 2003.
- [7] Hirai T., Philipps V., Huber A., Sergienko G., Linke J., Wakui T., Tanabe T., Rubel M., Wada M., Ohgo T., Ohya K., Pospieszczyk A., Barabash V., *Performance and erosion of a tungsten brush limiter exposed in the TEXTOR tokamak*, 14th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 69-73, 2003.
- [8] Jhung M. J., Park Y. W., *Deterministic Structural and Fracture Mechanics Analyses of Reactor Pressure Vessel for Pressurized Thermal Shock*, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 8, No. 1, 1999.
- [9] Jhung M. J., Park Y. W., *Deterministic Structural and Fracture Mechanics Analyses of Reactor Pressure Vessel for Pressurized Thermal Shock*, KINS/AR-656, Korea Institute of Nuclear Safety, February 1999.
- [10] Jung J. W., Bang Y. S., Seul K. W., Kim H. J., Lee J. I., *Thermal Hydraulic Mixing Analysis on Pressurized Thermal Shock International Comparative Assessment Study*", KINS/AR-593, 1998.
- [11] Kato D., Li Y., Shibata K., *Development of a PV Reliability Analysis Code Based on Probabilistic Fracture Methodology Part (2) Analysis Methodology Verification and Sensitivity Analysis*, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, 1998.
- [12] Laux M., Schneider W., Wienhold P., Juttner B., Huber A., Balden M., Linke J., Kostial H., Mayer M., Rubel M. et al., *Arcing at B4C-covered limiters exposed to a SOL-plasma*, Journal of Nuclear Materials, 313-316 () 64-68, 2003.
- [13] Niffenegger M., Reichlin K., *The Proper Use of Thermal Expansion Coefficients in Finite Element Calculations*, PSI TM-49-98-15, 1998.
- [14] Ohgo T., Wada M., Ohya K., Hirai T., Biel W., Tanabe T., Kondo K., Rapp J., Philipps V., Huber A. et al.: *Effect upon the core plasma radiation due to high power laser injection onto C, W and Ta test-limiters in TEXTOR*, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 1161-1165, 2003.
- [15] Ohya K., Hirai T., Tanabe T., Wada M., Ohgo T., Philipps V., Pospieszczyk A., Huber A., Sergienko G., Brezinsek S., Noda N., *Simulation of hydrogen and hydrocarbon release from W-Ta and W-C twin test limiters in TEXTOR edge plasma*, 14th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 571-575, 2003.
- [16] Schimpfke T., Sievers J., *Reactor Pressure Vessel - International Comparative Assessment Study: Analyses on Deterministic Fracture Mechanics (DFM) Tasks - Technical Note*, GRS Technical Note, December 1997.
- [17] Schimpfke T., Sievers J., *Vergleichsanalysen zur bruchmechanischen Bewertung unterstellter Risse in einem Reaktordruckbehälter mit internationaler Beteiligung (RPV-PTS-ICAS)*, 24. MPA Seminar, Stuttgart, 1998.
- [18] Sherry A., Richardson T., Sillitoe R., Trusty F., *Analysis of Benchmark PTS Problem: Comparison of R6 and 3D-Finite Element Results*, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Boston, 1999.

- [19] Shibata K., Kato D., Li Y., *Development of a PV Reliability Analysis Code Based on Probabilistic Fracture Methodology Part (1) Outline of the Code*, 1998 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, 1998.
- [20] Shibata K., Kato D., Li Y., *Development of PFM Code for Evaluating Reliability of Pressure Components subjected to transient Loading*, to be presented at SM1RT-15, Seoul, 1999.
- [21] Sievers J., Bass R., Miller A. G., *Activities of the OECD Nuclear Energy Agency in the Area of RPV PTS Fracture Mechanics Analysis*, paper G2-A2-FR of SM1RT - 15, Seoul, 1999.
- [22] Sievers J., Schimpfke T., *Verifikation bruchmechanischer Methoden durch Vergleichsanalysen mit internationaler Beteiligung (FALSIRE, NESC, RPV PTS ICAS)*, 21. GRS-Fachgespräch, München, 1997.
- [23] Von Seggern J., Wienhold P., Hirai T., Philipps V., *Long term behavior of material erosion and deposition on the vessel wall and remote areas of TEXTOR-94*, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 441-446, 2003.
- [24] Wada M., Hirai T., Ohgo T., Tanabe T., Ohya K., Philipps V., Huber A., Sergienko G., Pospieszczyk A., Noda N., *Inhomogeneous heat loading to high-Z test limiters depending upon the limiter materials*, 14th International Conference on Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices, Journal of Nuclear Materials, 313-316, pp. 294-298, 2003.
- [25] Yehia Vaßen R., Duwe R., Stöver D., *Ceramic SiC/B<sub>4</sub>C/C-composites as plasma facing components for fusion reactors*, Proc. of the 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Fusion Reactor Materials (ICFRM7), Obninsk, Russian Federation, Sept. 25-29, 1995, Journal of Nuclear Materials 233-237, pp. 1266-1270, 1996.