

Piotr LÖSCHNER¹
Piotr NIEŚLONY²
Krzysztof JAROSZ³

WPLYW PRZEMIESZCZENIA NISZCZĄCEGO NA WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ MES

W artykule przedstawiono wpływ parametru przemieszczenia niszczącego U_f na wyniki symulacji numerycznej procesu skrawania w programie Abaqus/CAE. W symulacji wykorzystano model konstytutywny Johnsona-Cooka, opracowany dla stopu tytanu Ti6Al4V. Omówiono warunki brzegowe oraz wpływ zmiękczenia termicznego stopu tytanu przy różnych prędkościach skrawania na wyniki symulacji MES. Wykazano znaczący wpływ przemieszczenia niszczącego U_f na przebieg dekohezji i kształtowanie wióra.

Słowa kluczowe: prędkość odkształcenia, MES, przemieszczenie niszczące

1. Wprowadzenie

Programowanie symulacji numerycznych MES dla procesów i zjawisk, w których zachodzi dekohezja materiału, wymaga zdefiniowania kryterium określającego moment usuwania danego elementu skończonego z siatki MES [5]. W tym celu można się posłużyć parametrem definiowanym w literaturze jako energia rozdziału G_f [3]. Możliwe jest również wykorzystanie przemieszczenia niszczącego U_f jako kryterium rozdziału materiału. W procesie skrawania dekohezja materiału zachodzi zawsze w warunkach intensywnego odkształcania ze znacznymi prędkościami, co determinuje konieczność uwzględnienia w symulacjach MES parametrów opisujących to zjawisko [5]. W tym celu w niektórych pakietach MES definiuje się kryterium przemieszczenia niszczącego U_f . W przeciwieństwie do energii rozdziału G_f , U_f jest parametrem zależnym od zastosowanej w symulacji MES siatki elementów skończonych [3].

Między innymi symulacje, które prowadzili Ambati i in. [1], potwierdziły znaczący wpływ zarówno gęstości siatki, jak i przyjętego przemieszczenia niszczącego U_f na wyniki symulacji procesu formowania wióra. W artykule przedstawiono wpływ doboru wartości U_f na wyniki symulacji na prostym przy-

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Piotr Löschner, Politechnika Opolska, ul. S. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole, tel.: 725162237, e-mail: pleszner1@gmail.com

² Piotr Nieślony, Politechnika Opolska, e-mail: p.nieslony@po.opole.pl

³ Krzysztof Jarosz, Politechnika Opolska, e-mail: jarosz.krzysztof91@gmail.com

kładzie toczenia ortogonalnego wraz z dyskusją na temat jego znaczenia, zakresu stosowalności oraz istotności w procesie symulacji MES obróbki skrawaniem.

2. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku programu Abaqus/CAE 2016. Celem przeprowadzonych symulacji było ustalenie odpowiedniej, dla danej gęstości siatki oraz modelu konstytutywnego, wartości przemieszczenia niszczonego w celu uzyskania poprawnego spęczenia wióra oraz jego akceptowalnego kształtu. W symulacjach wykorzystano model konstytutywny Johnsona-Cooka (J-C) w postaci [4, 7]:

$$\sigma_p = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}^0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{ot}}{T_t - T_{ot}} \right)^m \right] \quad (1)$$

gdzie: σ_p – naprężenia uplastyczniające,

ε^p – odkształcenia plastyczne,

$\dot{\varepsilon}^p$ – prędkość odkształceń plastycznych,

$\dot{\varepsilon}^0$ – prędkość odkształcenia odniesienia,

T – temperatura,

T_t – temperatura topnienia materiału,

T_{ot} – temperatura otoczenia,

A, B, C, m, n – stałe zależne od modelowanego materiału obrabianego.

Dodatkowo zdefiniowano warunki zniszczenia materiału, tj. jego dekohezji, będącej efektem oddziaływania ostrza na materiał obrabiany. W celu ich określenia posłużono się dostępnym w Abaqus/CAE rozszerzonym modelem J-C, określającym odkształcenia krytyczne przy inicjacji zniszczenia [4]:

$$\bar{\varepsilon}_D^p = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}^0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\Theta}) \quad (2)$$

gdzie: $\bar{\varepsilon}_D^p$ – odkształcenie zastępcze przy inicjacji zniszczenia,

$\dot{\varepsilon}^p$ – prędkość odkształceń plastycznych,

$\dot{\varepsilon}^0$ – prędkość odkształcenia odniesienia,

$\hat{\Theta}$ – temperatura względna,

d_1-d_5 – stałe, zależne od materiału parametry inicjacji zniszczenia,

η – stosunek naprężeń normalnych do naprężeń zastępczych Hubera-Misesa.

3. Dane wejściowe

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych wpływu wartości przemieszczenia niszczonego na dekohezję materiału należy wprowadzić do programu

Abaqus/CAE wiele danych wejściowych, takich jak właściwości fizyczne materiału, parametry modelu J-C czy warunki brzegowe. Za materiał obrabiany przyjęto stop tytanu Ti6Al4V. Parametry modelu konstytutywnego dla tego stopu oraz konieczne do symulacji właściwości fizyczne zostały zaczerpnięte z literatury [6] i przedstawione w tab. 1.

Tabela 1. Zestawienie parametrów modelu Johnsona-Cooka, stałych dla modelu dekohezji oraz właściwości fizycznych stopu Ti6Al4V [7]

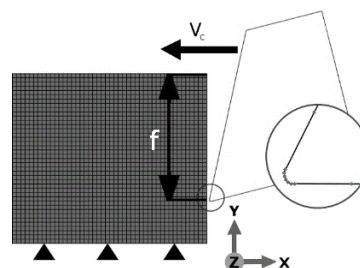
Table 1. Parameters of Johnson-Cook model, constants for failure model and physical properties of Ti6Al4V alloy [7]

A [Pa]	B [Pa]	C	n	m	$\dot{\epsilon}^0$ [s ⁻¹]	P [kg/m ³]	E [Pa]	ν
$862 \cdot 10^6$	$331 \cdot 10^6$	0,012	0,34	0,8	1	4430	$11 \cdot 10^9$	0,33
d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	-	-	-	-
-0,09	0,25	-0,5	0,0014	3,87	-	-	-	-

Geometrię ostrza oraz przedmiotu obrabianego zamodelowano w środowisku programu Abaqus/CAE. Dla przedmiotu obrabianego przyjęto globalną wielkość elementu skończonego $L = 5 \cdot 10^{-6}$ m. Dyskretyzację modelu ostrza przeprowadzono przez podział na konkretną liczbę elementów skończonych (15 dla powierzchni natarcia i przyłożenia, 10 dla promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej). Ostrze skrawające zamodelowano jako nieodkształcalne. Wykorzystano rodzaj elementów skończonych typu C3D8R. Badania symulacyjne prowadzono dla stałych parametrów technologicznych: prędkości skrawania $v_c = 60$ m/min, posuwu $f = 0,15$ mm/obr. i głębokości skrawania $a_p = 1$ mm. Jako temperaturę otoczenia przyjęto $T_{ot} = 20^\circ\text{C}$. Temperatura topnienia dla tego stopu wynosi od 1604 do 1660°C . Dla obliczeń MES przyjęto $T_t = 1630^\circ\text{C}$. Graficzną wizualizację technologicznych parametrów wejściowych oraz model geometryczny dla stanu odpowiadającego warunkom brzegowym przedstawiono na rys. 1.

Rys. 1. Warunki brzegowe dla symulacji

Fig. 1. Boundary conditions assumed in the simulation

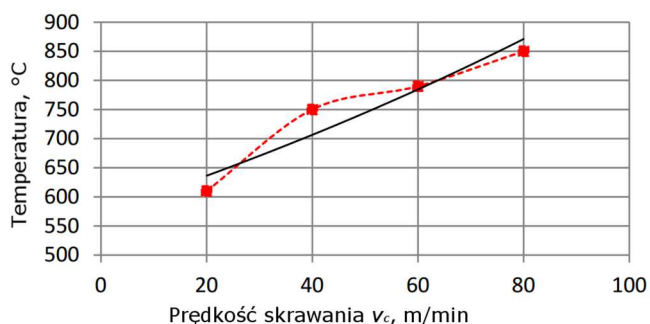


Przemieszczenie niszczone zostało wyznaczone zgodnie ze wzorem (3) [6] na podstawie przyjętej wcześniej stałej wielkości charakterystycznej elementu skończonego $L = 5 \cdot 10^{-6}$ m oraz wykresu z rys. 3, przedstawiającego zmiany

charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych w funkcji temperatury. Z wykresów odczytywano odkształcenie nominalne w momencie rozerwania próbki ε^{pl} dla wybranej temperatury w strefie skrawania. Temperaturę właściwą dla przyjętej v_c szacowano na podstawie rys. 2 [2]. Przyjęto temperaturę 800°C jako przybliżenie dla wybranej prędkości skrawania. Przedstawione w tab. 2 pozostałe wartości temperatur przyjęto w celu ukazania wpływu niewłaściwego doboru temperatury w strefie skrawania, a tym samym odkształcenia, na wartość przemieszczenia niszczonego U_f . Jak wykazano we wnioskach, U_f ma istotny wpływ na wynik symulacji numerycznej:

$$U_f = L \cdot \varepsilon^{pl} \quad (3)$$

gdzie: L – charakterystyczny wymiar elementu skończonego,
 ε^{pl} – odkształcenie nominalne w momencie rozerwania próbki.



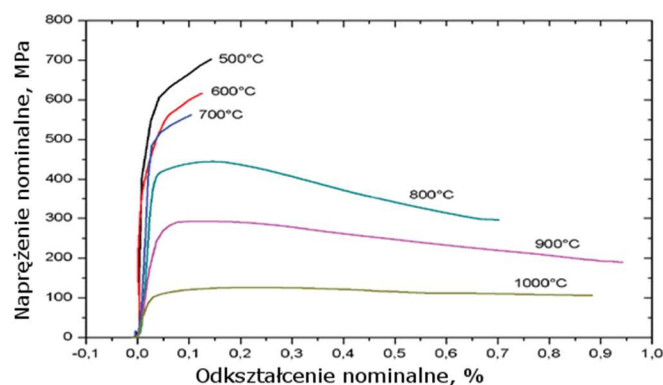
Rys. 2. Wpływ prędkości skrawania na zmiany temperatury w strefie skrawania przy obróbce stopu Ti6Al4V. Linia czarną pokazano przybliżenie otrzymanych wyników pomiarów

Fig. 2. Effect of cutting speed on the change in temperature in the cutting zone in machining of Ti6Al4V alloy. The black line shows an approximation of measurement results

Tabela 2. Obliczone na potrzeby symulacji wartości przemieszczenia niszczonego dla $L = 5 \cdot 10^{-6}$ m

Table 2. Values of displacement at failure for $L = 5 \cdot 10^{-6}$ m, evaluated for the simulation

Oznaczenie	U_{f1}	U_{f2}	U_{f3}	U_{f4}
Temperatura [°C]	500	700	800	1000
Odkształcenie [%]	0,16	0,11	0,7	0,88
Wartość U_{fi}	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$



Rys. 3. Zależność napężenie–odkształcenie dla stopu Ti6Al4V w zależności od temperatury

Fig. 3. Stress-strain relationship for Ti6Al4V alloy depending on the temperature

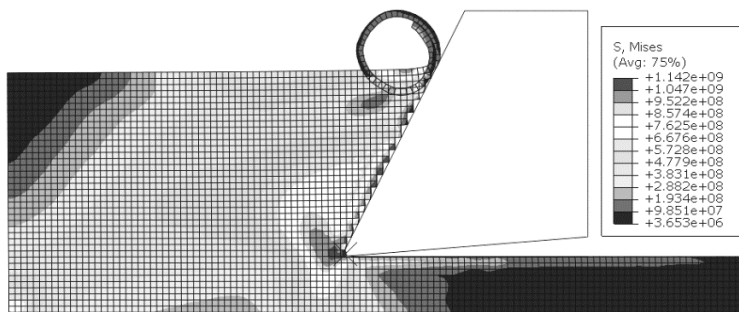
4. Badania symulacyjne

W wyniku przeprowadzonych symulacji, dla zmiennych wartości przemieszczenia niszczonego, otrzymano znacząco różne przebiegi dekohezji stopu tytanu przedstawione odpowiednio na rys. 4-7. Prezentację wyników symulacji wykonano dla założonego stałego czasu skrawania wynoszącego 3 ms.

Analizując wyniki symulacji w aspekcie procesu formowania wióra, przedstawione na rys. 4-7, można jednoznacznie stwierdzić, że wartość przemieszczenia niszczonego U_f ma znaczący wpływ na zmianę warunków dekohezji testowanego materiału. Widzialnym efektem tego wpływu jest między innymi zmiana objętości usuwanego materiału czy średniej grubości wióra wyliczonej na podstawie znanych wymiarów pojedynczego węzła siatki MES. Dla dwóch pierwszych badanych wartości przemieszczenia niszczonego uzyskano skrajnie małe grubości wióra. Dla $U_{f1} = 8 \cdot 10^{-7}$ wiór miał grubość bazowej odległości węzłów siatki MES, tj. 5 μm , a dla $U_{f2} = 5,5 \cdot 10^{-7}$ wzrosła jedynie do 10 μm . Wraz ze wzrostem wartości U_f przebieg symulowanej dekohezji stopu tytanu się zmienia. Dla wartości U_{f3} , jak i U_{f4} ($3,5 \cdot 10^{-6}$ - $4,4 \cdot 10^{-6}$), które wyliczono dla temperatur odpowiednio 800 oraz 1000°C, uzyskano podobną grubość wióra, wynoszącą w przybliżeniu 0,13 mm. Można było również określić pole przekroju poprzecznego pojedynczego wióra, które dla U_{f3} oraz U_{f4} wynosi odpowiednio 0,0912 mm² oraz 0,0989 mm².

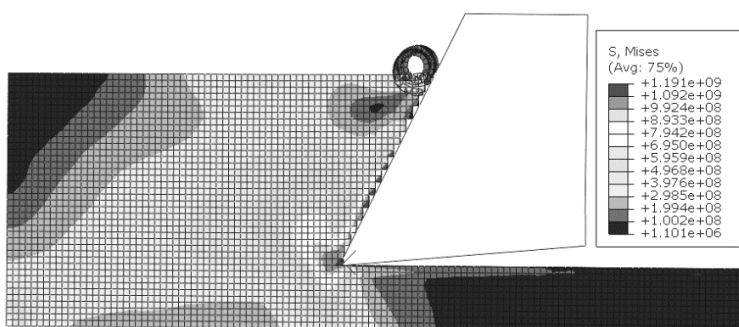
Zmianie podlega także rozkład naprężeń w strefie poślizgu, głównie przez wzrost obszaru występowania intensywniejszych naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa. Dla U_{f1} oraz U_{f2} nie zaobserwowano zmiany pola naprężeń w strefie poślizgu, co może wynikać bezpośrednio z niewielkiej objętości usuwanego materiału. Wyraźne pole wyższych wartości naprężenia ukształtowało się

dla U_{f3} oraz U_{f4} . Wraz ze wzrostem wartości U_f intensywność występowania wysokich naprężeń rosła, co stwierdzono na podstawie oceny wielkości pól naprężeń w obszarze strefy poślizgu. Dla U_{f3} oraz U_{f4} wyniosły one odpowiednio 0,0054 oraz 0,0087 mm². Należy podkreślić, że we wszystkich analizowanych przypadkach wartość przemieszczenia niszczonego U_f wyznaczono dla innych zakresów temperatury.



Rys. 4. Wyniki symulacji naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa dla parametru $U_{f1} = 8,0 \cdot 10^{-7}$ wyznaczonego dla $T = 500^\circ\text{C}$

Fig. 4. Simulation results of equivalent Huber-Mises stress for parameter $U_{f1} = 8.0 \cdot 10^{-7}$ determined for $T = 500^\circ\text{C}$

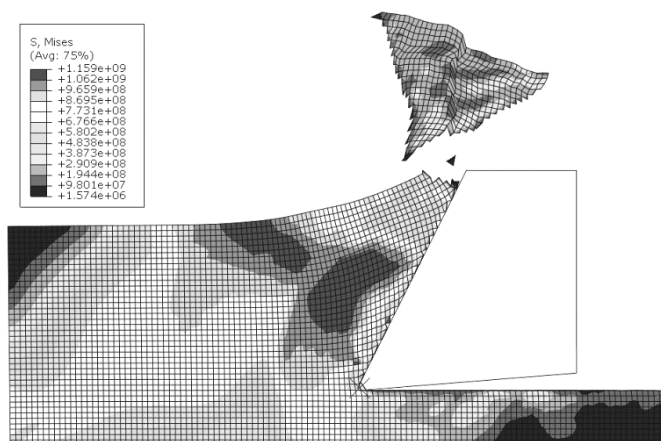


Rys. 5. Wyniki symulacji naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa dla $U_{f2} = 5,5 \cdot 10^{-7}$ wyznaczonego dla $T = 700^\circ\text{C}$

Fig. 5. Simulation results of equivalent Huber-Mises stress for $U_{f2} = 5.5 \cdot 10^{-7}$ determined for $T = 700^\circ\text{C}$

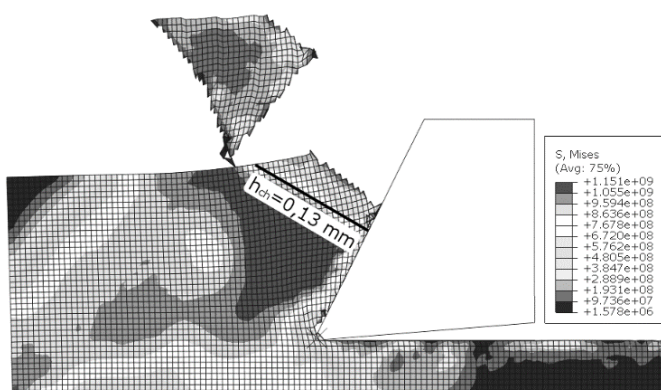
Analizując zależności naprężeniowo-odkształceniowe stopu Ti6Al4V w funkcji temperatury, zauważono, że w zakresie 500-700°C graniczne odkształcenie nominalne waha się od 0,11 do 0,16%. Dla wyższych temperatur zakres ten jest prawie 6-krotnie większy (0,7; 0,88). Właśnie w przypadku tych wyższych wartości odkształceń zastosowanie wyliczonych parametrów U_f pozwoliło na osiągnięcie akceptowalnych wyników symulacji MES, ocenianych głównie przez

uzyskanie spęczenia materiału i segmentacji wióra porównywalnych z wynikami badań eksperymentalnych. Dla temperatur z zakresu poniżej i do 700°C występują znaczne przekłamania w wynikach symulacji, gdzie obserwowano zbyt małą grubość wióra oraz brak jego segmentacji. Podczas samej symulacji powstawał także problem z usuwaniem elementów skończonych z siatki MES (rys. 4 i 5).



Rys. 6. Wyniki symulacji naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa dla $U_{\beta} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ wyznaczonego dla $T = 800^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Simulation results of equivalent Huber-Mises stress for $U_{\beta} = 3.5 \cdot 10^{-6}$ determined for $T = 800^{\circ}\text{C}$



Rys. 7. Wyniki symulacji naprężeń zredukowanych Hubera-Misesa dla $U_{f4} = 4,4 \cdot 10^{-6}$ wyznaczonego dla $T = 1000^{\circ}\text{C}$

Fig. 7. Simulation results of equivalent Huber-Mises stress for $U_{f4} = 4.4 \cdot 10^{-6}$ determined for $T = 1000^{\circ}\text{C}$

Jednoznacznie parametr U_f wpływa na efekt symulacji MES. Ze względu na jego ściśle powiązanie z temperaturą skrawania należy dążyć do jak najbardziej precyzyjnego jego wyznaczenia. Obecnie problemem podczas symulacji numerycznych może być powiązanie dynamicznie zmieniającej się temperatury w strefie dekohezji ze zmianami parametru U_f .

5. Podsumowanie

Modelowanie procesów obróbki ubytkowej stopów trudnoskrawalnych jest zagadnieniem trudnym, ze względu na silną zależność odkształcenia rzeczywistego materiału od jego temperatury. Przeprowadzone symulacje potwierdziły konieczność poprawnego doboru odpowiedniej wartości przemieszczenia niszczącego U_f oraz znaczną zależność wyników symulacji od zmiany charakterystyk wytrzymałościowych obrabianego materiału w funkcji temperatury. Zaobserwowano, że przy doborze wartości przemieszczenia niszczącego U_f należy uwzględnić wpływ zmiękczenia termicznego materiału odpowiedni dla temperatury w strefie skrawania właściwej dla danego zakresu parametrów procesu technologicznego. W przypadku ocenianego materiału wzrost U_f przyczynił się do znacznej poprawy wyników symulacji MES, szczególnie w aspekcie obserwowanej postaci wióra. Poprawnie wyznaczone charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe w funkcji temperatury pozwalają na ustalenie adekwatnego parametru przemieszczenia niszczącego, gdzie ważne jest odkształcenie krytyczne (niszczące). Regulując jedynie parametrem U_f , można było dosyć istotnie sterować symulacją MES, zarówno w zakresie formowania wióra, dekohezji materiału obrabianego, jak i rozkładu oraz umiejscowienia naprężeń zredukowanych. Wydaje się, że dla pakietu symulacyjnego Abaqus parametr ten ma istotne znaczenie funkcjonalne, a ze względu na jego czułość należy go wyznaczać bardzo starannie.

Podziękowania

W badaniach wykorzystano wyniki uzyskane w ramach Projektu Programu Badań Stosowanych (edycja I), Nr PBS1-178595, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] Ambati R., Yuan H.: FEM mesh-dependence in cutting process simulations, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 53 (2011) 313-323.
- [2] Conradie P.J.T., Oosthuizen G.A., Treurnicht N.F., Al Shalane A.: Overview of work piece temperature measurement techniques for machining of Ti6Al4V, *South African J. Industrial Eng.*, 23 (2012) 116-130.
- [3] Hogström P., Ringsberg J.W., Johnson E.: Experimental verification of finite element failure criteria with respect to strain state and element size, *Proc. Twelfth Int. Conf. Fracture (ICF12)*, Ottawa 2009, pp. 10-20.

- [4] Kosmol J., Mieszczak W.: Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania procesu wiercenia, *Modelowanie Inżynierskie*, 6 (2009) 169-176.
- [5] Niestony P., Grzesik W.: Modelowanie procesu i operacji skrawania metodą elementów skończonych (MES). Cz. I. Podstawy i programy symulacyjne, *Mechanik*, 86 (2013) 825-833.
- [6] Podręcznik użytkownika programu Abaqus/CAE.
- [7] Zhang Y., Outeiro J.C., Mabrouki T.: On the selection of Johnson-Cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting, *Procedia CIRP*, 31 (2015) 112-117.

THE EFFECT OF DISPLACEMENT AT FAILURE ON THE RESULTS OF FEM NUMERICAL SIMULATION

S u m m a r y

In the article the effect of displacement at failure U_f on the simulation results of machining process conducted in Abaqus/CAE program is presented. A Johnson-Cook constitutive model with parameters adequate for Ti6Al4V titanium alloy was used in the simulation. Boundary conditions and the effects of thermal softening at different cutting speeds on the simulation results were described. The results shows a substantial effect of displacement at failure value on decohesion and chip formation.

Keywords: strain rate, FEM, displacement at failure

DOI: 10.7862/rm.2017.45

Przesłano do redakcji: 12.08.2017

Przyjęto do druku: 18.10.2017

