

Dr hab. inż. Andrzej GONTARZ, prof. PL; mgr inż. Jacek PIESIĄK
Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Lublin

Model pęknięcia według kryterium Cockrofta-Lathama dla stopu magnezu MA2 w warunkach kształtowania na gorąco

Crack model according to Cockroft-Latham criterion for magnesium alloy MA2 in hot forming conditions

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących zjawiska pęknięcia stopu magnezu MA2 (wg GOST) odkształcanego plastycznie. Celem badań było wyznaczenie całki granicznej charakteryzującej kryterium Cockrofta-Lathama. Wartość całki określono na podstawie rozciągania próbki z przewężeniem, aż do wystąpienia pęknięcia oraz symulacji numerycznych wykonanych testów. W badaniach doświadczalnych próbki nagrzewano do temperatur: $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ i rozciągano je z prędkościami: $v = 0,5\text{ mm/s}$, $v = 5\text{ mm/s}$ i $v = 50\text{ mm/s}$. Na podstawie uzyskanych wyników określono wpływ temperatury i prędkości odkształcenia na wartość całki granicznej dla badanego stopu magnezu.

Abstract

Research results concerning the phenomenon of cracking of formed magnesium MA2 alloy (according to GOST) are presented in this paper. The aim of the research was determining limiting integral characterizing Cockroft-Latham criterion. The integral value was determined on the basis of tensile test of a specimen with necking until the crack presence and numerical simulations of made tests. In experimental research forgings were heated till temperatures: $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T=350\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$, and they were stretched with velocities $v=0,5\text{ mm/s}$, $v=5\text{ mm/s}$ and $v=50\text{ mm/s}$. On the basis of the obtained results, the influence of temperature and strain rate on the limiting integral value for the analyzed magnesium alloy was given.

Słowa kluczowe: stop magnezu, pęknięcie, kryterium Cockrofta-Lathama

Key words: magnesium alloy, cracking, Cockroft-Latham criterion

1. WPROWADZENIE

Analiza części konstrukcyjnych stosowanych w krajowym przemyśle lotniczym wykazała, że większość części ze stopów magnezu wykonywana jest z odlewów, które sprowadzane są z zagranicy. Odlewy te są drogie i nie zawsze spełniają stawiane wymagania. Lepsze własności części można uzyskać stosując jako półfabrykaty elementy wykonane metodami obróbki plastycznej. Należy jednak podkreślić, że procesy kształtowania plastycznego stopów magnezu są specyficzne i niejednokrotnie prawidłowa ich realizacja w praktyce przemysłowej jest zadaniem trudnym.

1. INTRODUCTION

The analysis of constructional parts applied in domestic aviation industry has shown that majority of parts from magnesium alloys is made from the imported casts. These casts are expensive and they not always meet the requirements. Better parts properties can be obtained using as semi-finished products elements made by means of metal forming. It should be, however, stated that metal forming processes of magnesium alloys are of specific character and their proper realization in industrial practice is often very difficult.

Głównym ograniczeniem zastosowania jest mała plastyczność tych stopów, powodująca powstawanie pęknięć. W przypadku stopów magnezu zjawisko to występuje częściej niż przy kształtowaniu innych metali nieżelaznych czy też stali.

Za celowe uznano więc opracowanie metody przewidywania wystąpienia pęknięć jeszcze na etapie analizy teoretycznej projektowanego procesu, która polega na symulacji procesu kształtowania z zastosowaniem odpowiedniego modelu pęknięcia. Znane warunki graniczne pozwalają prognozować ewentualne wystąpienie pęknięć i w czasie projektowania podejmować przeciwdziałania temu niekorzystnemu zjawisku.

Zagadnienie wyznaczenia tych granicznych warunków scharakteryzowanych najczęściej wartością graniczną odpowiedniej całki dla danego gatunku materiału i modelu pęknięcia nie jest ściśle określone. W literaturze specjalistycznej opisanych jest wiele różnych kryteriów pęknięcia [1÷9].

W programach przeznaczonych do symulacji procesów obróbki plastycznej często stosowane jest kryterium Cockrofta-Lathama. Dlatego podjęto badania zmierzające do wyznaczenia stałych charakteryzujących kryterium Cockrofta-Lathama w warunkach kształtowania na gorąco stopu magnezu MA2, którego skład chemiczny przedstawiono w tablicy 1.

2. METODYKA BADAŃ

W związku z występującymi różnicami wyników w zakresie wyznaczenia całek granicznych w kryteriach pęknięcia podjęto próbę wyznaczenia ich metodą doświadczalno-teoretyczną. Założono, że metoda polegać będzie na rozciąganiu próbek do momentu pęknięcia, a następnie wykonaniu symulacji metodą elementów skończonych tej próby doświadczalnej i wyznaczeniu granicznej wartości całki w momencie pęknięcia.

The main limitation concerning their application is small plasticity of these alloys, leading to cracks appearance. In the case of magnesium alloys this phenomenon is more often present than during forming of other non-ferrous metals or steel.

Hence, it was regarded as purposeful to work out a method of cracks appearance foreseeing at the stage of theoretical analysis of the designed process, which is based on forming process simulation with the application of appropriate cracking model. When limiting conditions are known, it is possible to forecast probable cracks and to take steps eliminating this phenomenon.

The issue of determining these limiting conditions, characterized usually by limiting value of appropriate integral for a chosen material type and cracking model, is not precisely stated. In specialist literature, there are many types of various cracking criteria described [1÷9].

Cockroft-Latham criterion is often used in software for simulations of metal forming processes. Because of that, research have been done aiming at determining constants characterizing Cockroft-Latham criterion in hot forming conditions of magnesium MA2 alloy, which chemical constitution is shown in table 1.

2. RESEARCH METHODOLOGY

Due to the presence of differences of results within the scope of limiting integrals determining in cracking criteria, attempts were made to determine them by means of theoretical and experimental method. It was assumed that this method would be based on specimens stretching till their cracking, and next, on simulation by means of finite element method of this experimental test and determining limiting integral value in the moment of cracking.

Tablica 1. Skład chemiczny stopu MA2 (wg GOST)

Table 1. Chemical constitution of alloy MA2 (according to GOST)

Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Be	Zn	Mg	Inne
≤ 0,05	≤ 0,1	0,15÷0,5	≤ 0,005	3÷4	≤ 0,05	≤ 0,02	0,2÷0,8	94,4÷97,65	0,3

W przypadku symulacji procesu rozciągania występują jednak problemy przy obliczeniach numerycznych. Wyidealizowany model teoretyczny próby rozciągania powoduje, że bardzo często przy obliczeniach, w próbce występuje wydłużenie równomierne i nie zachodzi lokalizacja odkształceń oraz nie powstaje przewężenie. Jest to stan różny od występującego w rzeczywistości i porównywanie wyników obliczeń z rezultatami doświadczenia staje się wtedy niecelowe.

W związku z tym założono, że w badaniach zastosowane zostaną próbki z przewężeniami w części pomiarowej (rys. 1a). Zastosowanie takich próbek pozwoliło uniknąć problemów występujących przy symulacji procesu rozciągania. Ponadto, lokalizacja pęknięcia jest znana. Pęknięcie występuje w miejscu najmniejszej średnicy części pomiarowej próbki.

Badania doświadczalne realizowano na symulatorze fizycznym Gleeble 3800. Podstawowe parametry charakteryzujące symulator są następujące:

- maksymalna prędkość ruchu narzędzi: 2000 mm/s,
- nacisk maksymalny: 20 MG,
- prędkość nagrzewania: do 10 °C/s,
- maksymalna temperatura nagrzewania: 1700 °C,
- oporowy system nagrzewania próbek,
- możliwość wykonania testów w stanie obniżonego ciśnienia lub atmosfery ochronnej.

Przyjęto, że dla każdego zestawu parametrów próba rozciągania wykonywana będzie trzykrotnie. Na rys. 1b pokazano próbki, przygotowane do wykonania testu.

Próbki po zamocowaniu w symulatorze Gleeble 3800 nagrzewano z prędkością 10 °C/s do temperatury próby i po wytrzymaniu w tej temperaturze przez okres 5 s rozciągano z założoną prędkością, aż do zerwania. Temperaturę próbki - T mierzono termoparą umieszczoną w części pomiarowej. Próbkę zamocowaną w uchwytach przygotowaną do badań przedstawiono na rys. 2.

In the case of simulation of stretching process, there are, however, problems with numerical calculations. Idealized theoretical model of tensile test very often causes in calculations even elongation in the forging and lack of local strains and necking. This state is different from the one in reality and comparison of calculation results with experimental results is not then purposeful.

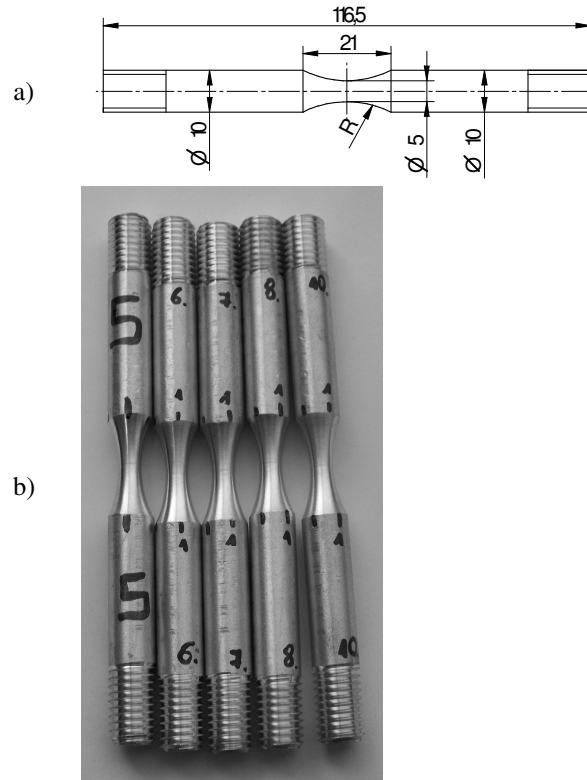
Because of that, it was assumed that in research specimens with necking in the measuring element would be used (Fig.1). The application of these type of specimens allowed to avoid problems present during simulation of the tensile test. Moreover, the cracks localization is known. The cracks appears in the place of the smallest diameter of the forging measuring element.

Experimental research were done on Gleeble's physical simulator 3800. The basic characteristic parameters of the simulator are as follow:

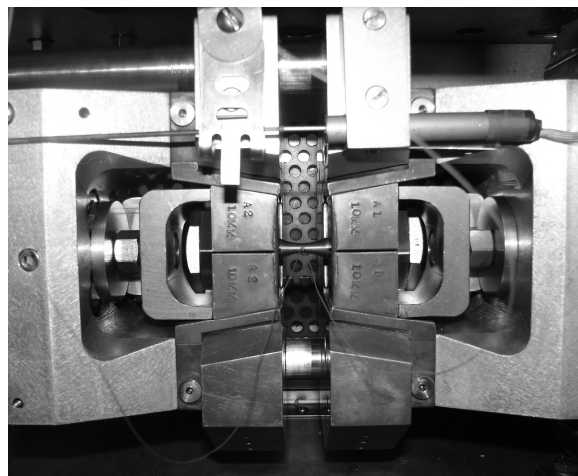
- *maximal tools movement velocity: 2000 mm/s,*
- *maximal pressure: 20 MG,*
- *heating velocity: up to 10 °C/s,*
- *maximal heating temperature: 1700 °C,*
- *forgings heating resistance system,*
- *possibility of tests making in conditions of lowered pressure or protective atmosphere.*

It was assumed that for each set of parameters the tensile test would be make three times. In Fig. 1b are presented specimens for the test.

The specimens, after placing in the Gleeble's simulator 3800, were heated with velocity 10° C/s to the test temperature, and, after being in this temperature for 5s, they were stretched with the assumed velocity till rupture. The specimen temperature T was measured by means of thermocouple placed in the measuring element. The specimen mounted in jaws and prepared for research is presented in Fig. 2.



Rys. 1. Próbkki zastosowane do badań: a) kształt i ważniejsze wymiary, b) próbki wykonane ze stopu MA2
 Fig. 1. Specimens used in tests: a) shape and main dimensions, b) specimens made from MA2 alloy



Rys. 2. Próbkka umieszczona w uchwytach symulatora Gleeble 3800
 Fig. 2. Specimen placed in jaws of Gleeble's simulator 3800

Przyjęto, że próbki nagrzane do temperatur: $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ będą rozciągane z prędkością równą $v = 5\text{ mm/s}$. Ponadto, celem określenia wpływu prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}$ na zjawisko pęknięcia, w przypadku temperatury nagrzewania próbki $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ zastosowano dodatkowo dwie prędkości rozciągania: $v = 0,5\text{ mm/s}$ i $v = 50\text{ mm/s}$.

It was assumed that specimens heated to temperatures $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ would be stretched with velocity $v = 5\text{ mm/s}$. Moreover, in order to determine strain rate $\dot{\epsilon}$ influence on cracking phenomenon, in the case of forging heating temperature $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, additionally two stretching velocities were considered $v = 0,5\text{ mm/s}$ and $v = 50\text{ mm/s}$.

W eksperymencie mierzono temperaturę próbki, siłę rozciągania oraz przemieszczenie narzędzia. Po zerwaniu, próbki zostały zmierzone, celem określenia wielkości wydłużenia do momentu pęknięcia. Próbkę po zerwaniu przedstawiono na rys. 3, natomiast parametry prób doświadczalnych oraz wyniki pomiarów niezbędnych do wyznaczenia wartości granicznej całki Cockrofta-Lathama przedstawiono w tablicy 2.

During the experiment the specimen temperature, stretching force and tool movement were measured. After rupture the specimens were measured in order to specify the size of elongation till the moment of cracking. The specimen after rupture is shown in Fig. 3, however, experimental tests parameters and results of measurements necessary for determining Cockroft-Latham integral limiting value are presented in table 2.

Tablica 2. Parametry prób rozciągania oraz wyniki pomiarów próbek ze stopu MA2, niezbędne do wyznaczenia wartości granicznej całki Cockrofta-Lathama

Table 2. Tensile tests parameters and results of measurements of specimens from MA2 alloy, necessary for determining limiting value of Cockroft-Latham integral

Nr próby No tests	T [°C]	v [mm/s]	D [mm]	d [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	a_3 [mm]	a_4 [mm]	a_{sr} [mm]	L [mm]	L_k [mm]
1	250	5	10,12	5,00	21,00	21,50	22,00	22,10	21,65	117,00	119,91
2	250	5	9,95	5,10	21,15	21,00	22,00	21,50	21,41	116,50	119,49
3	250	5	9,98	5,00	22,00	21,30	22,15	21,70	21,79	116,50	119,79
4	350	0,5	9,78	4,99	20,90	21,39	21,54	21,54	21,34	116,90	120,41
5	350	0,5	9,90	5,20	21,00	21,50	22,00	21,75	21,56	117,00	120,74
6	350	0,5	9,85	5,07	20,82	20,83	21,96	21,50	21,28	117,07	120,54
7	350	5	9,90	5,10	21,20	22,00	21,35	21,20	21,44	116,80	120,25
8	350	5	9,83	5,00	21,82	21,38	21,23	21,78	21,55	117,11	120,58
9	350	5	10,10	5,05	21,50	22,30	21,20	21,75	21,69	116,50	119,88
10	350	50	9,84	5,07	21,98	21,81	21,86	20,77	21,61	116,38	119,76
11	350	50	10,00	5,10	22,00	21,25	22,00	22,30	21,89	116,80	120,35
12	350	50	10,05	5,20	22,15	21,70	21,00	21,50	21,59	116,50	120,60
13	450	5	10,00	5,00	22,00	21,50	21,00	21,80	21,58	117,15	119,77
14	450	5	9,95	5,15	21,30	22,00	21,50	21,70	21,63	117,00	119,55
15	450	5	10,00	5,00	22,00	21,90	21,00	21,50	21,60	117,00	119,36

Oznaczenia: L – długość początkowa próbki, L_k – długość próbki w momencie zerwania, d – średnica przewężenia próbki, D – średnica próbki, a_1, a_2, a_3, a_4 – długość przewężonej części próbki, mierzona w czterech różnych płaszczyznach, a_{sr} – średnia długość części przewężonej próbki

Markings: L – initial length of specimen, L_k – forging length in the moment of rupture, d – specimen necking diameter, D – specimen diameter, a_1, a_2, a_3, a_4 – length of forging necked part measured at four different planes, a_{sr} – average length of forging necked part



Rys. 3. Próbkę ze stopu MA2 zerwaną w próbie rozciągania na symulatorze Gleeble 3800

Fig. 3. Specimen from MA2 alloy ruptured in tensile test in Gleeble's simulator 3800

3. ANALIZA WYNIKÓW

Analiza wyników polegała na symulacji przeprowadzonych prób doświadczalnych, zgodnie z zastosowanymi parametrami podanymi w tablicy 2 i na tej podstawie określeniu wartości całki granicznej Cockrofta-Lathama - C_{gr} .

Do obliczeń zastosowano program Deform 3D oparty na metodzie elementów skończonych. Kształty próbek modelowych odpowiadały wymiarom rzeczywistym. W obliczeniach wykorzystano model materiałowy wyznaczony w badaniach własnych w plastometrycznej próbie ściskania, opisany w opracowaniu [10].

Próbkę modelowano za pomocą elementów czterowęzłowych. Wykonanie symulacji numerycznej pozwoliło m.in. na obliczenia wartości całki C_{gr} charakteryzującej moment zniszczenia według znormalizowanego kryterium Cockrofta-Lathama opisanego zależnością:

$$\int_0^{\varepsilon^*} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon = C_{gr}, \quad (1)$$

gdzie:

- σ_1 - największe naprężenie główne,
- σ_i - intensywność naprężenia,
- ε^* - graniczne odkształcenie pęknięcia,
- C_{gr} - stała materiałowa wyznaczana doświadczalnie (całka graniczna).

3. ANALYSIS OF RESULTS

The analysis of results was based on simulation of experimental tests, according to the applied parameters given in table 2, and, after that, determining values of Cockroft-Latham limiting integral C_{gr} .

The software DEFORM 3D based on finite element method was used in calculations. Specimens shapes corresponded with real dimensions. In calculations, material model destined for own research in plastometer compression test and described in the work [10] was applied.

The specimen was modeled by means of four-node elements. Numerical simulation allowed for e.g. calculating of integral value C_{gr} characterizing the destruction moment according to normalized criterion Cockroft-Latham, described by equation:

$$\int_0^{\varepsilon^*} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon = C_{gr}, \quad (1)$$

where:

- σ_1 - maximal principal stress,
- σ_i - equivalent stress,
- ε^* - cracking limiting strain,
- C_{gr} - material constant determined in experiments (limiting integral).

Przy stosowanych prędkościach rozciągania v osiągnięto następujące prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}$ w środkowej części przewężenia:

- dla $v = 0,5 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 0,107 \text{ s}^{-1}$,
- dla $v = 5 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 0,427 \text{ s}^{-1}$,
- dla $v = 50 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 1,30 \text{ s}^{-1}$.

Na rysunku 4 pokazano rozkład całki Cockrofta-Lathama w próbce poddanej próbie rozciągania. Największe wartości całki przyjmuje w środku przewężenia. Tam też podczas prób doświadczalnych dochodziło do naruszenia spójności materiału. Zatem wartość całki w tym miejscu w fazie rozciągania odpowiadającej pęknięciu przyjmowano jako wartość graniczną. Stosowano uśrednienie wartości z trzech punktów (rys. 5) zlokalizowanych w obszarze największego przewężenia w odległości od osi próbki (w stanie wyjściowym) o:

- $P_1 - 0 \text{ mm}$ (Punkt nr 1),
- $P_2 - 1,25 \text{ mm}$ (Punkt nr 2),
- $P_3 - 2,5 \text{ mm}$ (Punkt nr 3).

Uśrednione wartości graniczne całki C_{gr} wyznaczone numerycznie dla poszczególnych prób rozciągania zestawiono w tabelicy 3, natomiast prezentację graficzną rozkładu uśrednionej wartości granicznej całki w funkcji temperatury, dla prędkości rozciągania $v = 5 \text{ mm/s}$ pokazano na rys. 6. Z danych zamieszczonych w tabelicy 3 i na rys. 6 wynika, że uzyskane wartości całki mieszczą się w granicach $0,1 \div 0,25$. Są one bardzo małe i świadczą o małej plastyczności stopu magnezu MA2 w zakresie badanych temperatur.

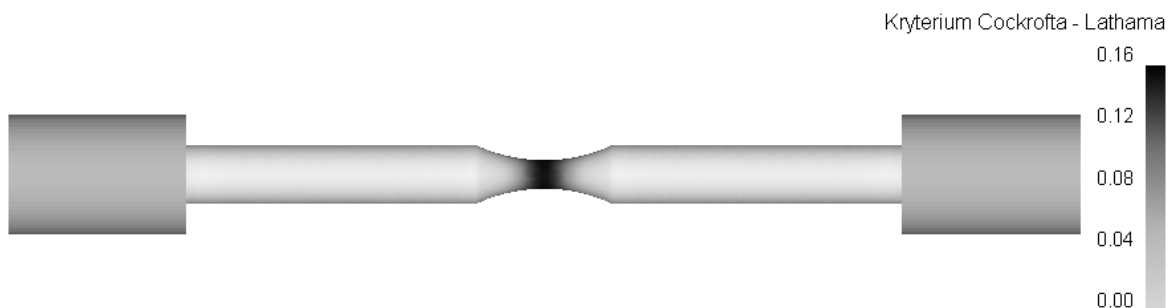
For the applied stretching velocities v the following strain rates $\dot{\epsilon}$ were obtained in the middle part of the necking:

- for $v = 0,5 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 0,107 \text{ s}^{-1}$,
- for $v = 5 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 0,427 \text{ s}^{-1}$,
- for $v = 50 \text{ mm/s}$ - $\dot{\epsilon} \approx 1,30 \text{ s}^{-1}$.

Figure 4 presents the distribution of Cockroft-Latham integral in the specimen which underwent stretching. The integral reaches the largest values in the middle of the necking. There, during experimental tests, the coherence of material was disturbed. Hence, the integral value in this place during stretching corresponding with cracking was assumed as the limiting value. Averaging of values from three points (Fig. 5) localized within the area of the largest necking from the forging axis (at the initial stage) was applied, where:

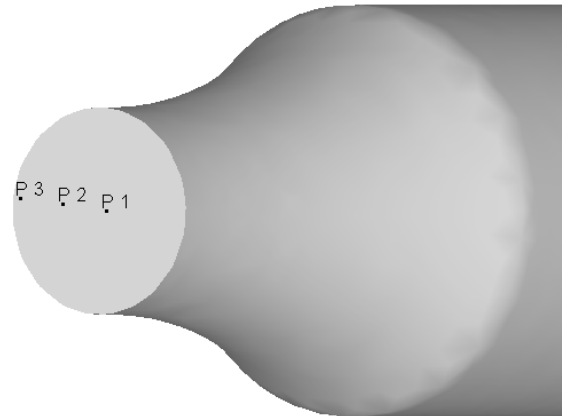
- $P_1 - 0 \text{ mm}$ (Point no 1),
- $P_2 - 1,25 \text{ mm}$ (Point no 2),
- $P_3 - 2,5 \text{ mm}$ (Point no 3).

The average integral C_{gr} limiting values determined numerically for particular tests of stretching are shown in table 3, and graphic presentation of the distribution of average limiting value of the integral in the function of temperature, for stretching velocity $v=5\text{mm/s}$ is given in Fig. 6. From the data in Table 3 and Figure 6 result that the obtained integral values are within the scope $0,1 \div 0,25$. They are very small and they are connected with small plasticity of magnesium alloy MA2 within the scope of analyzed temperatures.



Rys. 4. Rozkład całki według kryterium Cockrofta-Lathama w próbce nagrzejanej do temperatury $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ rozciąganej z prędkością $v = 5 \text{ mm/s}$

Fig. 4. Distribution of integral according to Cockroft-Latham criterion in the forging heated to $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ and stretched with velocity $v = 5 \text{ mm/s}$

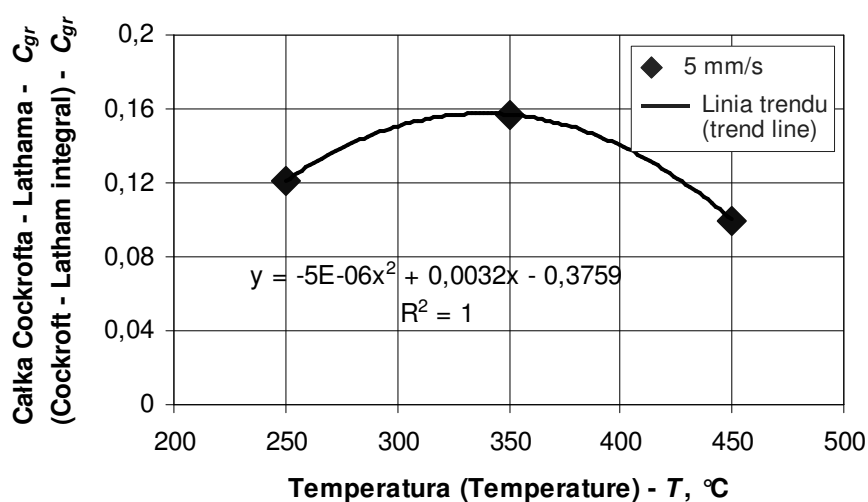


Rys. 5. Położenie punktów pomiarowych w przekroju próbki

Fig. 5. Localization of measuring points in specimen section

Tablica 3. Wartości graniczne całki Cockrofta-Lathama C_{gr} wyznaczone dla stopu MA2Table 3. Limiting values of Cockroft-Latham integral C_{gr} determined for MA2 alloy

Temperatura - T , Temperature - T , °C	Prędkość rozciągania - v , Stretching velocity - v mm/s	Średnia wartość całki granicznej Cockrofta-Lathama - C_{gr} Average value of Cockroft-Latham limiting integral - C_{gr}
250	5	0,121
350	0,5	0,243
350	5	0,157
350	50	0,093
450	5	0,100

Rys. 6. Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama C_{gr} , w zależności od temperatury T (°C), dla prędkości rozciągania $v = 5$ mm/s wyznaczona dla stopu MA2Fig. 6. Limiting value of Cocroft-Latham integral C_{gr} , depending on temperature T (°C), for stretching velocity $v = 5$ mm/s determined for MA2 alloy

Dla porównania całka graniczna dla kryterium Cockrofta-Lathama w przypadku stali kształtowanej w zakresie temperatur obróbki plastycznej na gorąco osiąga wartość $0,7 \div 0,8$.

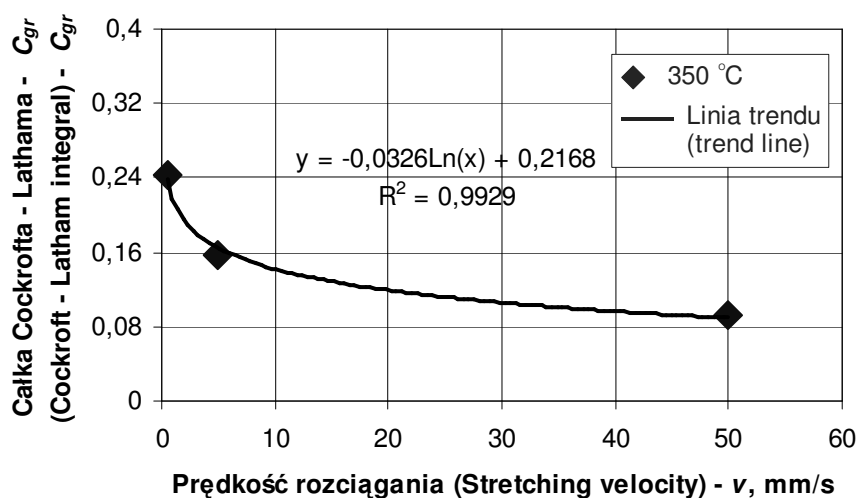
Dla badanych temperatur nagrzewania próbki przy prędkości rozciągania $v = 5 \text{ mm/s}$ największą wartość całki granicznej $0,157$ uzyskano dla temperatury $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. Przy temperaturach $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ całka graniczna przyjmuje znacznie mniejsze wartości. Na podstawie uzyskanych wyników można zatem wyciągnąć wniosek, że temperatura początku kształtowania na gorąco stopu MA2 jest niższa od $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura końca kształtowania na gorąco tego stopu jest wyższa od $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Jest to zgodne z danymi podanymi w opracowaniu [11], zgodnie z którymi temperatura początku i końca kucia na gorąco na prasie wynosi odpowiednio $T = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$, natomiast na młocie odpowiednio $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ i $T = 340 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na rys. 7 i 8 przedstawiono wykres zależności granicznej wartości całki Cockrofta-Lathama - C_{gr} odpowiednio od prędkości rozciągania próbki - v (mm/s) oraz od prędkości odkształcenia - $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) w przewężeniu próbki, a więc w miejscu pęknięcia. Można zaobserwować, że im większa prędkość odkształcenia, tym wartość graniczna całki jest mniejsza, co oznacza, że materiał charakteryzuje się mniejszą plastycznością.

For example, limiting integral values for Cockroft-Latham criterion in the case of steel formed within the scope of metal forming temperatures in hot conditions reach values $0,7 \div 0,8$.

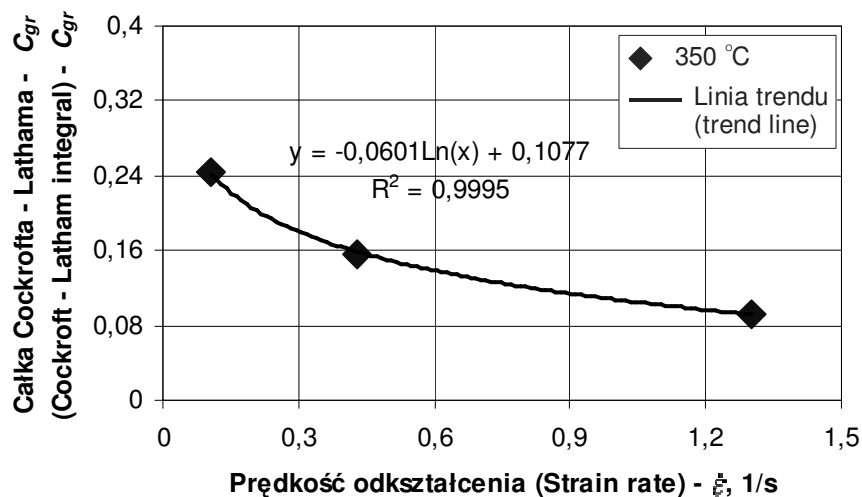
For the analyzed forging heating temperatures at stretching velocity $v = 5 \text{ mm/s}$, the largest value of limiting integral $0,157$ was reached for the temperature $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. At the temperatures $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, limiting integral assumed relatively lower values. It can be concluded, on the basis of the obtained results, that the temperature of the forming beginning in hot conditions of MA2 alloy is lower than $T = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, and the temperature of the forming ending in hot conditions of this alloy is larger than $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Hence, it is consistent with the data given in the work [11], according to which the temperature at the beginning and at the end of forging in press is $T = 420 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ respectively, and for forging in hammer $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ and $T = 340 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figures 7 and 8 present the diagram of Cockroft-Latham integral C_{gr} limiting value dependency from forging stretching velocity - v (mm/s) and from strain rate $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) in the forging necking, hence, in the area of cracking. It can be observed that the larger is the strain rate, the lower integral limiting value is, which means that material is characterized by lower plasticity.



Rys. 7. Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama C_{gr} , w zależności od prędkości rozciągania v (mm/s) dla temperatury nagrzewania próbki $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ wyznaczona dla stopu MA2

Fig. 7. Limiting value of Cockroft-Latham integral C_{gr} , depending on stretching velocity v (mm/s) measured for heating temperature of the specimen $T = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ determined for MA2 alloy



Rys. 8. Wartość graniczna całki Cockrofta-Lathama C_{gr} , w zależności od prędkości odkształcenia $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) mierzonej w przewężeniu próbki dla temperatury nagrzewania próbki $T = 350$ °C wyznaczona dla stopu MA2

Fig. 8. Limiting value of Cockroft-Latham integral C_{gr} , depending on strain velocity $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) measured in the necking of specimen for heating temperature of the forging $T = 350$ °C determined for MA2 alloy

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalno-teoretycznych sformułowano następujące wnioski:

1. Zastosowana metoda badawcza oparta na rozciąganiu próbek z przewężeniem i symulacji numerycznej umożliwia wyznaczenie wartości całki granicznej kryterium Cockrofta-Lathama. Kształt próbki warunkuje wystąpienie pęknięcia w miejscu przewidywalnym (w przewężeniu) oraz eliminuje problemy związane z lokalizacją odkształcenia w symulacjach numerycznych prób doświadczalnych.
2. Badany stop magnezu MA2 charakteryzuje się bardzo małą plastycznością w zakresie badanych temperatur i prędkości odkształcenia. Całka graniczna kryterium Cockrofta-Lathama nie przekracza wartości 0,25, co w porównaniu z innymi materiałami jest wartością bardzo małą.
3. Prędkość odkształcenia ma istotny wpływ na plastyczność stopu MA2, przy czym im mniejsza prędkość odkształcenia tym wartość całki granicznej jest większa, co oznacza, że materiał jest bardziej plastyczny. W procesach kształtowania plastycznego na gorąco stopu MA2 należy zatem stosować małe prędkości odkształcenia.

4. CONCLUSIONS

On the basis of conducted experimental and theoretical research the following conclusions were made:

1. The applied research method based on stretching of specimen with necking and numerical simulation allows for determining of value of Cockroft-Latham criterion limiting integral. The forging shape conditions the cracks presence in the assumed area (in the necking) and eliminates problems connected with strain localizing in numerical simulations of experimental tests.
2. The analyzed magnesium alloy MA2 is characterized by small plasticity within the scope of analyzed temperatures and strain rates. Cockroft-Latham criterion limiting integral does not exceed the value 0,25, which, in comparison with other materials, is a very small value.
3. Strain rate has a considerable influence on MA2 alloy plasticity, yet, the lower the strain rate is, the larger is the value of limiting integral. This means that the material has larger plasticity. Hence, in forming processes in hot conditions of alloy MA2, small strain rates should be used.

4. Analiza wpływu temperatury na wartość całki granicznej wykazała, że stop MA2 charakteryzuje się najlepszą plastycznością w temperaturze $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bardzo mała plastyczność w temperaturach $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ świadczy o tym, że leżą one poza wąskim zakresem temperatur kształtowania na gorąco badanego stopu.

4. *The analysis of temperature influence on limiting integral value showed that MA2 alloy had the best plasticity in the temperature $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Very small plasticity in temperatures $T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ means that these temperatures do not belong to a narrow scope of forming temperatures in hot conditions of the analyzed alloy.*

Badania realizowane w ramach Projektu "Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Financial support of Structural Funds in the Operational Programme - Innovative Economy (IE OP) financed from the European Regional Development Fund - Project "Modern material technologies in aerospace industry", Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Gouveia B.P.P.A., Rodrigues J.M.C., Martins P.A.F.: Ductile fracture in metalworking: experimental and theoretical research. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 101, 52-63.
- [2] Behrens A., Just H.: Verification of the damage model of effective stresses in cold and warm forging operations by experimental testing and FE simulations. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, vol. 125-126, 295-301.
- [3] Rzyńska G.: Zjawisko pęknięcia w procesie wyciskania metalowych kompozytów warstwowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009.
- [4] Zhigang W., Shuhui L., Weigang Z., Wurong W.: Ductile fracture simulation of hydropiercing process based various criteria in 3D modeling. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, 3662-3663.
- [5] Neimitz A.: *Mechanika pęknięcia*. PWN, Warszawa 1998.
- [6] Hongsheng L., Yuying Y., Zhongqi Y., Zhenzhong S., Yongzhi W.: The application of a ductile fracture criterion to the prediction of the forming limit of sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, 5443-5447.
- [7] Saanouni K.: On the numerical prediction of the ductile fracture in metal forming. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, vol. 75, 3545-3559.
- [8] Teixeira P., Santos A.D., Andrade Pires A.M., César de Sá J.M.A.: Finite element prediction of ductile fracture in sheet metal forming processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 177, 278-281.
- [9] Hoa V. C., Seo D. W., Lim J. K.: Site of ductile fracture initiation in cold forging: A finite element model. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2005, vol. 44, 58-69.
- [10] Gontarz A., Dziubińska A.: Własności stopu magnezu MA2 (wg GOST) w warunkach kształtowania na gorąco. *Rudy i Metale Nieżelazne*, 2010, R55, Nr 6, 340-344.
- [11] Kornijev N.I. (i in.): *Kovka i stampovka cvetnykh metallov*. Spravocznik. Izdatelstvo Maszynostrojenije, Moskva 1972.