



## Metody intensywnego odkształcenia plastycznego

P. Snopiński, B. Ziębowicz

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

email: przemyslaw.snopinski@polsl.pl, email: boguslaw.ziebowicz@polsl.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono opis najpopularniejszych metod intensywnego odkształcenia plastycznego oraz charakterystyczne własności materiałów ultra-drobnziarnistych wytwarzanych opisanymi technikami.

**Abstract:** The paper presents a description of the most popular methods of intensive plastic deformation and characteristic properties of ultra-fine grained materials produced as described techniques.

**Słowa kluczowe:** intensywne odkształcenie plastyczne SPD, ECAP, HPT, rozdrobnienie ziarna, materiały nanostrukturalne

### 1. WSTĘP

Od lat wiadomo, że silna akumulacja odkształcenia plastycznego ma istotny wpływ na strukturę oraz własności mechaniczne materiałów metalowych. Jako przykładem można posłużyć się dobrze znanymi procesami walcowania czy też ciągnięcia, którym również towarzyszy rozdrobnienie ziarna, co wpływa na wzrost własności mechanicznych. Jednakże konwencjonalne metody odkształcenia bardzo często prowadzą do obniżenia plastyczności materiału, co w przypadku wielu zastosowań jest niepożądane a czasem nieakceptowalne. Ograniczenia te spowodowały wzrost zainteresowania opracowywaniem nowych metod SPD, pozwalających na wytwarzanie materiałów o strukturach silnie rozdrobnionych wykazujących zupełnie nowe fizyczne i mechaniczne własności, włączając w to zwiększoną plastyczność [1÷4].

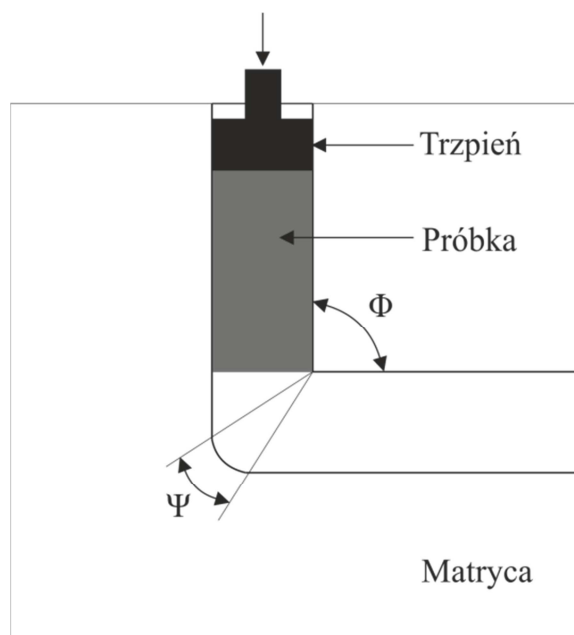
Obróbka plastyczna metali z wykorzystaniem metod intensywnego odkształcenia plastycznego w ostatnich latach jest coraz powszechniej stosowana. Przyczyny tego zainteresowania należy dopatrywać się w możliwości osiągnięcia dużego rozdrobnienia ziarna do zakresu mikrometrycznego a czasem nanometrycznego a przede wszystkim w wymiernych korzyściach płynących z wytworzenia takich struktur. Istnieje wiele metod SPD, jednakże najpopularniejszymi technikami, skupiającymi największą uwagę naukowców stały się w ostatnich latach przeciskanie przez kanał kątowy (ECAP) oraz skręcanie pod wysokim ciśnieniem (HPT). Obie metody pozwalają na efektywne wprowadzenie dużej gęstości dyslokacji do materiału, w efekcie umożliwiając uzyskanie struktury ultradrobnziarnistej [1÷4].

## 2. METODY INTENSYWNEGO ODKSZTAŁCENIA PLASTYCZNEGO

### 2.1. Przciskanie przez kanał kątowy

Przciskanie przez kanał kątowy (ang. *Equal Channel Angular Pressing*) jest jedną z wielu technik wytwarzania materiałów o strukturze ultradroboziarnistej i nanostrukturalnej zaliczanych do procesów “top down”. W metodzie tej wsad o przekroju kwadratowym, prostokątnym lub cylindrycznym poddany jest działaniu bardzo intensywnego odkształcenia plastycznego poprzez wielokrotne wyciskanie specjalnym trzpieniem w matrycy składającej się z dwóch kanałów. Element ulega odkształceniu w wyniku działania naprężeń ścinających w obszarze zagięcia kanału. Technologia ta pozwala na formowanie materiałów bez zmiany geometrii wsadu co odróżnia ją od klasycznej obróbki plastycznej. Zastosowanie metody ECAP pozwala w sposób kontrolowany i korzystny na zmianę własności szerokiej gamy materiałów metalowych [1÷3].

Matryca do przciskania kąтового (rys. 1) składa się z dwóch identycznych kanałów o przekroju prostokątnym, kwadratowym bądź kołowym krzyżujących się ze sobą pod ściśle określonym kątem, zazwyczaj większym bądź równym  $90^\circ$ . Przedmiot obrabiany, którego kształt odpowiada przekrojowi poprzecznemu matrycy umieszczany jest wewnątrz kanału, gdzie następuje jego prciskięcie z wykorzystaniem specjalnego trzpienia. Ilość przepustów powtarzana jest aż do osiągnięcia pożądanej wielkości zakumulowanego odkształcenia. Aby zapobiec zużyciu bądź zniszczeniu matrycy w obszarze zagięcia kanału, niezbędne jest zastosowanie odpowiednich środków smarujących. Jedną z istotnych zalet metody ECAP jest możliwość wielokrotnego powtórzenia procesu bez zmian średnicy próbki przez co zastosowane odkształcenie może zostać zwiększone do dowolnego poziomu, w efekcie prowadząc do wytworzenia materiału o unikalnych własnościach [1,2].



Rysunek 1. Schemat procesu ECAP [3]

Figure 1. Schematic illustration of ECAP process [3]

## Czynniki wpływające na rozdrobnienie ziarna

### Kąt przecięcia kanałów matrycy

Wartość kąta pod którym przecinają się kanały matrycy jest jednym z najistotniejszych czynników wpływających na rozdrobnienie ziarna a zarazem własności mechaniczne materiału w procesie ECAP. Całkowita energia odkształcenia zmagazynowana w materiale zależna jest od liczby przepustów oraz krzywizny przecinających się kanałów. Krzywiznę określa się jako kąt pomiędzy dwoma kanałami  $\Phi$  oraz zewnętrzny kąt krzyżujących się kanałów  $\Psi$ . Wyniki badań wskazują niezbicie na to, iż największe rozdrobnienie ziarn oddzielonych od siebie granicami szerokokątowymi uzyskiwane jest z wykorzystaniem matrycy w której kanały przecinają się pod kątem  $\Phi=90^\circ$ . Pewnym ułatwieniem procesowym, szczególnie dla materiałów o niższej plastyczności jest wykorzystanie matryc w których kąt  $\Phi$  jest większy niż  $90^\circ$ , jednak badania wskazują na to, że nie jest możliwe uzyskanie takiego samego stopnia rozdrobnienia jak w przypadku kąta  $\Phi=90^\circ$  [2÷4].

Wartość odkształcenia zastępczego w warstwie środkowej wyciskanego materiału można obliczyć z wyrażenia:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right]$$

gdzie: N – liczba przepustów, natomiast parametry geometryczne odpowiadają oznaczeniom zamieszczonym na rysunku 1.

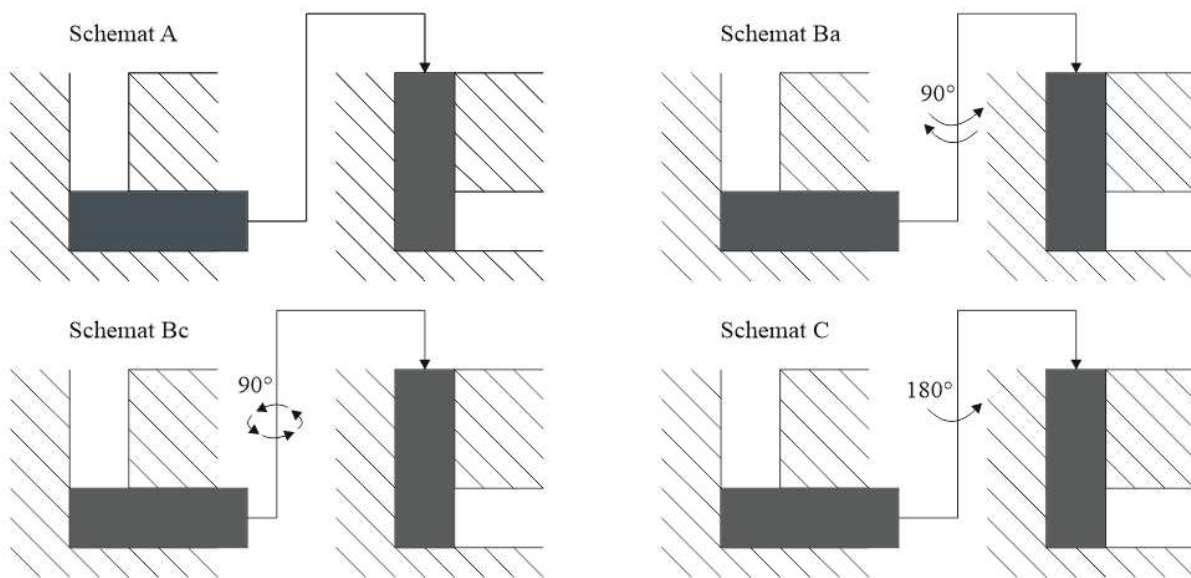
### Schemat odkształcania

Spośród czynników procesowych oraz materiałowych historia odkształcania, a w szczególności zmienny schemat odkształcania jest parametrem szczególnie istotnym. Dobór drogi odkształcania pozwala zaplanować proces przeciskania, w taki sposób, że możliwe jest wytworzenie materiału o określonych własnościach mechanicznych. Poprzez zmianę orientacji wsadu pomiędzy kolejnymi przepustami możliwe jest wytworzenie struktury charakteryzującej się różnym stopniem odkształcania. W celu osiągnięcia intensywnego rozdrobnienia ziarna (do rozmiarów nanometrycznych) niezbędne staje się opracowanie optymalnych parametrów procesu przeciskania. W metodzie ECAP wykorzystywane są trzy schematy odkształcania (rys. 2) polegające na zmianie orientacji wsadu pomiędzy kolejnymi przepustami, co pozwala na modyfikację tekstury oraz mikrostruktury przerabianego materiału [2]:

- schemat A – wsad nie jest obracany,
- schemat B – wsad obracany jest o kąt  $90^\circ$  po każdym przepuście (w przypadku gdy obrót następuje naprzemiennie o kąt  $90^\circ$  schemat określany jest jako Ba, natomiast gdy próbka obracana jest zawsze w tym samym kierunku Bc),
- schemat C – gdy wsad obracany jest o kąt  $180^\circ$  po każdym przepuście.

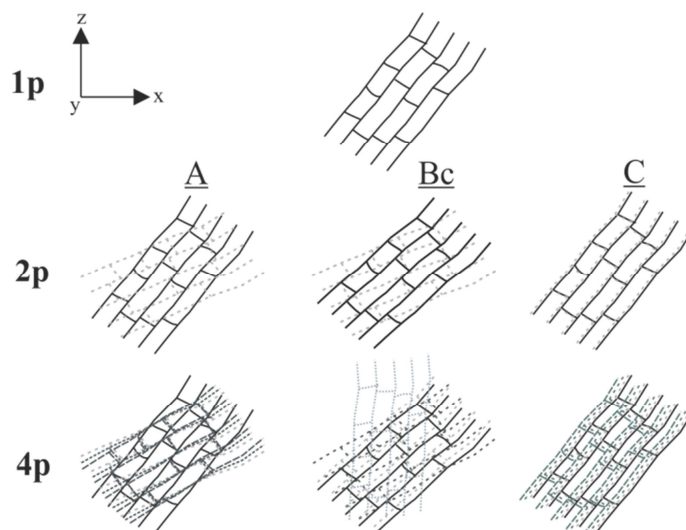
Schemat odkształcania wpływa na ukierunkowanie płaszczyzn ścinania w kolejnych przepustach (rys. 3). I tak, wykorzystując matrycę w której kąt przecinających się kanałów wynosi  $90^\circ$ , podczas odkształcania według schematu A ścinanie zachodzi w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach. Odkształcenie według schematu B powoduje przecięcie się płaszczyzn ścinania pod kątem  $60^\circ$ , natomiast w przypadku schematu C płaszczyzna ścinania

nie ulega zmianie w trakcie następujących po sobie cyklach wyciskania. Efektywność procesu rozdrobnienia ziarna w kolejnych cyklach uzależniona jest od ułożenia płaszczyzn ścinania. Najlepsze efekty uzyskuje się podczas wyciskania przez matrycę o kącie krzywizny kanału  $90^\circ$  z wykorzystaniem schematu Bc co skutkuje otrzymaniem najbardziej zdeformowanej struktury i jednocześnie największej akumulacji odkształcenia (rys. 4) [1÷4].



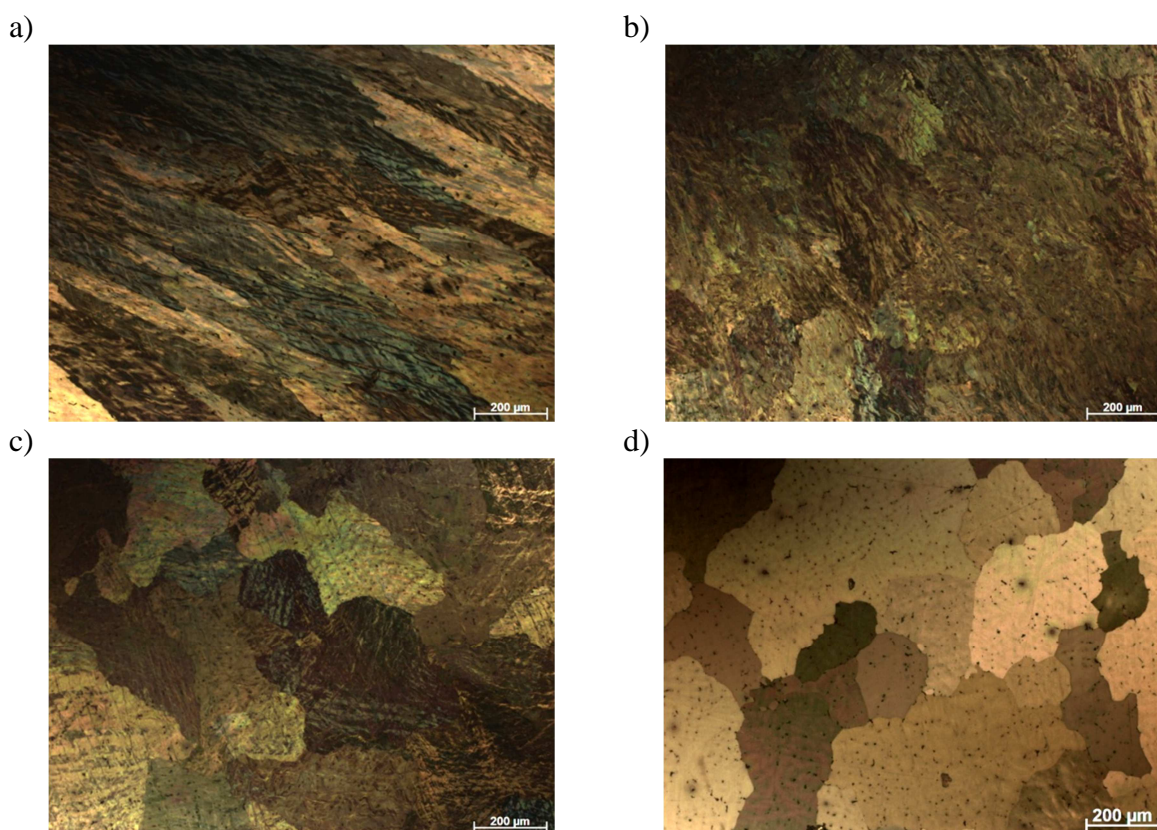
Rysunek 2. Schemat dróg odkształcenia w procesie ECAP [2]

Figure 2. Schematic illustration of processing routes in ECAP process [2]



Rysunek 3. Model rozdrobnienia ziarna w procesie ECAP dla 1, 2, 4 przepustów z wykorzystaniem dróg odkształcenia A, Bc oraz C [1]

Figure 3. A model for grain refinement in ECAP process for 1, 2 and 4 passes using routes A, Bc and C [1]



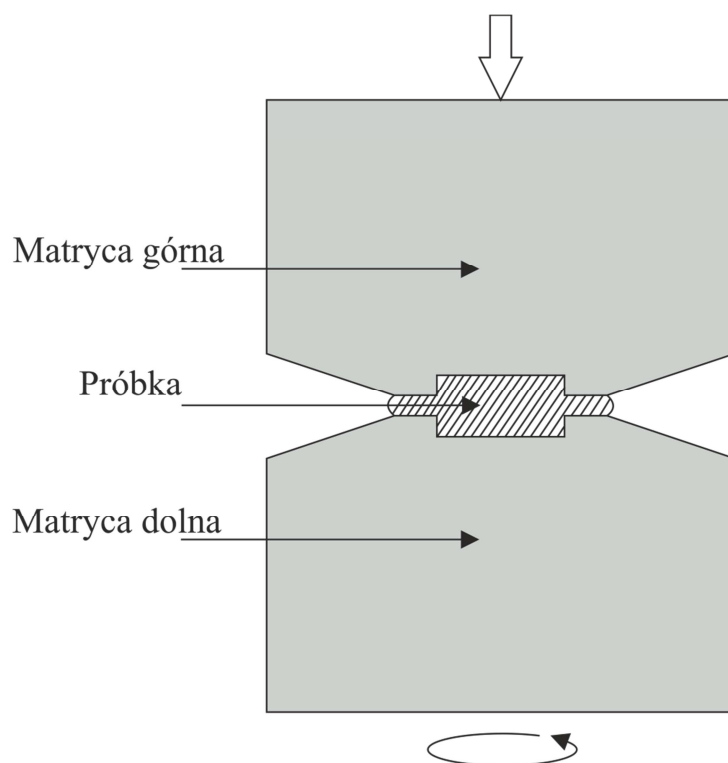
Rysunek 4. Struktura stopu aluminium z magnezem obserwowana w świetle spolaryzowanym powiększenie 100x a) ECAP droga odkształcenia A, b) ECAP droga odkształcenia Bc, c) ECAP droga odkształcenia C, d) stan wyjściowy

*Figure 4. Structure of aluminium magnesium alloy observed under polarized light mag. 100x a) ECAPed route A, b) ECAPed route Bc, c) ECAPed route C, d) initial state*

## 2.2. Skręcanie pod wysokim ciśnieniem (HPT)

Metoda skręcania pod wysokim ciśnieniem została opracowana przez Bridgmana w latach trzydziestych XX w. Jednakże eksperyment przeprowadzony przez naukowca nie dostarczył dostatecznej ilości informacji dotyczących zmian strukturalnych w materiałach wytwarzanych tą techniką. Dopiero badania wykonane przez Erbela z wykorzystaniem stopów miedzi pozwoliły na lepsze zrozumienie a zarazem opis zmian strukturalnych zachodzących w materiale po procesie HPT. Eksperyment ten skierował także większą uwagę na korelację pomiędzy wzrostem własności mechanicznych a intensywnym odkształceniem plastycznym materiałów.

Metoda skręcania pod wysokim ciśnieniem (ang. *High Pressure Torsion*) (rys. 5), polega na równoczesnym ściskaniu oraz skręcaniu materiału pod wysokim ciśnieniem o wartości osiągającej kilka GPa. W metodzie tej odkształcenie materiału następuje poprzez ścinanie w warunkach ciśnienia quasi-hydrostatycznego. Do zalet tej metody należy zaliczyć możliwość odkształcania materiałów kruchych, takich jak: fazy międzymetaliczne, czy proszki metali. Natomiast największą wadą jest rozmiar produktu końcowego obróbki odznaczający się niewielką grubością i rozmiarem, co znacząco ogranicza przemysłowe zastosowanie tej metody [1,2].



Rysunek 5. Schemat procesu HPT [1]

Figure 5. Principle of HPT experiment [1]

### 3. WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW ULTRADROBNOZIARNISTYCH

Materiały o strukturze ultradrobnoziarnistej oraz nanokrystalicznej charakteryzują się zwiększonym udziałem ilościowym granic ziarn, co znaczenie wpływa na zmianę ich własności fizycznych oraz mechanicznych (plastyczność, moduł sprężystości, odporność zmęczeniowa oraz czułość na prędkość odkształcania). Redukcja rozmiaru poszczególnych ziarn powoduje wzrost udziału objętościowego granic ziarn przez co zmieniają się mechanizmy odkształcania oraz sposób ich działania – porównując do konwencjonalnych materiałów polikrystalicznych. Zagęszczenie dyslokacji w materiale odkształcanym obserwowane jest tylko do momentu wystąpienia “nasylenia”, po którym mogą zachodzić procesy anihilacji (zmniejszanie efektu umacniania dyslokacyjnego) co bezpośrednio wpływa na własności mechaniczne wytworzonego materiału [1÷4].

Obserwacja materiałów tradycyjnych jak i tych o strukturze silnie rozdrobnionej sugeruje, że rozdrobnienie struktury w materiałach wytwarzanych metodą ECAP i HPT wpływa na wzrost twardości oraz wytrzymałości w temperaturach traktowanych jako niskie [5,6]. Zaobserwowano także, iż rozdrobnienie ziarna do rozmiarów nanometrycznych jest powodem dalszego wzrostu twardości. Bardzo ważną z punktu widzenia metod intensywnego odkształcania plastycznego jest zależność Halla-Petcha. Relacja opisuje związek pomiędzy średnią wielkością ziarna a granicą plastyczności, granicą sprężystości i twardością. Klasyczne założenie zakłada, że głównym czynnikiem przez który rozdrobnienie struktury wpływa na umocnienie materiału jest spiętrzanie się dyslokacji przy granicach ziarn, co skutkuje wzrostem siły niezbędnej do odkształcania materiału zgodnie z równaniem Halla-Petcha [1÷3].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{D}}$$

gdzie:

$\sigma_y$  – granica sprężystości, Pa,

$\sigma_0$  – naprężenie uplastyczniające dla wnętrza ziarna (stała materiałowa), Pa,

$K$  – parametr Petcha (współczynnik umocnienia), Pa m<sup>1/2</sup>,

$D$  – średnica ziarna, m.

Doświadczalne wyniki pomiarów twardości przedstawione w publikacjach naukowych wykazują, że relacja ta ma inny charakter w przypadku, gdy wielkość ziarna zawiera się w zakresie mikrometrycznym w porównaniu do rozmiaru ziarna o wielkości około 20 nm. Materiały wytwarzane technologią ECAP czy też HPT charakteryzują się również wysoką odpornością na ścieranie, wysoką wytrzymałością zmęczeniową oraz odpornością na korozję a także biokompatybilnością (stopy tytanu), co jest szczególnie istotne w przypadku gdy materiał ma kontakt z żywą tkanką [1÷3].

#### 4. PODSUMOWANIE

Już od kilku dekad bada się zmiany strukturalne zachodzące w materiałach poddanych obróbce SPD oraz jej wpływ na ich własności mechaniczne. W ciągu ostatnich dziesięciu lat nasza wiedza o zjawiskach zachodzących w tych materiałach została gruntownie rozszerzona i uzupełniona. Jednakże wciąż pozostaje jeszcze wiele do zrobienia w celu dokładniejszego poznania i kontrolowania efektów intensywnego odkształcenia plastycznego w materiałach.

Z danych literaturowych wynika, iż istnieje wiele odmian procesu SPD. Nie ulega również wątpliwości, że w ciągu najbliższych lat opracowane zostaną nowe metody, a te wykorzystywane dotychczas będą rozwijane. Jednakże główne problemy techniczne pozostaną takie same, jak w przypadku tradycyjnych metod formowania metali. Jednym z nich jest problem integralności materiału odkształconego oraz to, że materiały charakteryzują się zróżnicowaną możliwością odkształcenia. Podwyższona temperatura, która często towarzyszy procesowi SPD może spowodować zanik efektów strukturalnych w wyniku zdrowienia i rekryształizacji a zarazem pomóc w odkształcaniu materiałów bardziej kruchych.

#### LITERATURA

1. B. Figueiredo, G. Langdon, Using severe plastic deformation for the processing of advanced engineering materials, *Materials Transactions* 50/7 (2009) 1613-1619.
2. J. Zrnik, S. Dobatkin, I. Mamuzic, Processing of metals by severe plastic deformation (SPD) – structure and mechanical properties respond, *Metabk* 47/3 (2008) 211-216.
3. K. Nakashima, Z. Horita, M. Nemoto, T. Langdon, Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing, *Acta Materialia* 46/5 (1998) 1589-1599.
4. R. Valiev, T. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Progress in Materials Science* 51/7 (2006) 881-981.

5. Y.J. Chen, Y.C. Chai, H.J. Roven, S.S. Gireesh, Y.D. Yu, J. Hjelen, Microstructure and mechanical properties of Al- $x$ Mg alloys processed by room temperature ECAP, *Materials Science and Engineering* 545A (2012) 139-147.
6. Y. Yuan, A. Ma, J. Jiang, F. Lu, W. Jian, D. Song, Y. Zhu, Optimizing the strength and ductility of AZ91 Mg alloy by ECAP and subsequent aging, *Materials Science and Engineering* 588A (2013) 329-334.