



Niskotemperaturowa konsolidacja wiórów z trudnoodkształcalnych stopów aluminium

Low-temperature consolidation of machining chips from hardly-deformable aluminum alloys

(1) Andrzej Korbel¹, (2) Włodzimierz Bochniak¹, (3) Romana Śliwa², (4) Paweł Ostachowski^{1*},
(5) Marek Łagoda¹, (6) Zygmunt Kusion¹, (7) Bartłomiej Trzebuniak¹

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

² Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Poland

Informacje o artykule

Data przyjęcia: 4.03.2016

Data recenzji: 11.04.2016

Data akceptacji: 30.06.2016

Wkład autorów

- (1) Autor koncepcji, założeń i metody
- (2) Autor koncepcji, założeń i metody
- (3) Autor koncepcji i założeń
- (4) Autor koncepcji, założeń i wykonawca badań
- (5) Autor koncepcji, założeń i wykonawca badań
- (6) Wykonawca badań
- (7) Wykonawca badań

Streszczenie

Na bazie wyników doświadczalnych, dokonano oceny możliwości recyklingu wiórów odpadowych z trudnoodkształcalnych stopów aluminium serii 2xxx i 7xxx, do postaci i cech litych wyrobów z pominięciem fazy ciekłej. W tym celu wykorzystano proces niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO. Badania cech geometrycznych, mechanicznych i strukturalnych wyrobów/prasówki pozwoliły na stwierdzenie ich pełnej konsolidacji i spełnienie wymagań stawianych wyrobom wytwarzanym z wlewków. W metodzie KOBO, dzięki intensywnej lokalizacji plastycznego płynięcia w pasmach ścinania, tworzenie wiązań atomowych pomiędzy sąsiadującymi ze sobą wiórami, związane jest z ich zagęszczeniem i odsłonięciem „świeżych” warstw przypowierzchniowych, pozbawionych tlenków i innych zanieczyszczeń. Co istotne, konsolidacja wiórów nie wymaga stosowania wysokiej, czy nawet podwyższonej temperatury procesu, co znacząco ogranicza niekorzystne zjawisko utleniania wiórów i negatywny wpływ na strukturę i własności mechaniczne wyrobów. W stosunku do innych metod recyklingu, niskotemperaturowe wyciskanie wiórów metodą KOBO, jawi się jako rozwiązanie w pełni innowacyjne, energooszczędne i technologicznie atrakcyjne (proces na zimno). Jego zastosowanie na zaadaptowanych do procesu KOBO pełnogabarytowych prasach przemysłowych, stwarza szansę na uzyskiwanie wyrobów o większych przekrojach poprzecznych i większym stopniu przerobu, a przy tym pozwoli na sterowanie własnościami wyrobu przez odpowiedni dobór parametrów prowadzenia procesu i ewentualnej obróbki cieplnej.

Słowa kluczowe: wióry metaliczne, konsolidacja plastyczna, niskotemperaturowe wyciskanie metodą KOBO, struktura i własności mechaniczne prasówki

Article info

Received: 4.03.2016

Reviewed: 11.04.2016

Accepted: 30.06.2016

Authors' contribution

- (1) Author of the concept, assumptions and the method
- (2) Author of the concept, assumptions and the method
- (3) Author of the concept and assumptions

Abstract

Basing on experimental data, the possibility to recycle machining chips from hardly-deformable aluminum alloys (series 2xxx and 7xxx) into products with properties of solids leaving the liquid phase out has been assessed. To that end, low-temperature extrusion by the KOBO method has been used. Research regarding geometrical, structural and mechanical properties of the final products/compacts revealed their total consolidation and proved their compatibility with requirements for products made of ingots. Due to intense localization of plastic flow in shear bands during the KOBO method, atomic bonding between adjoining chips is a result of their densification and “fresh” near-surface layers, clear of oxides and other pollutants, being revealed. Importantly, the chips consolidation process does not require high or even raised temperature, which significantly reduces the unfavorable phenomenon of chips

* Autor do korespondencji. Tel.: +48 12 617 26 52; e-mail: pawel.ostachowski@agh.edu.pl

* Corresponding author. Tel.: +48 12 617 26 52; e-mail: pawel.ostachowski@agh.edu.pl

- (4) Author of the concept and assumptions; researcher
 (5) Author of the concept and assumptions; researcher
 (6) Researcher
 (7) Researcher

oxidation and its negative influence on the structure and mechanical properties of products. In comparison with other recycling solutions, low-temperature extrusion of machining chips by the KOBO method seems to have a range of advantages – it is innovative, energy-saving and technologically attractive (low-temperature process). The method's application on specially adapted full-size industrial presses makes it possible to obtain products with bigger cross-sectional areas and higher extrusion ratio, at the same time allowing to control the properties of products through a relevant choice of parameters for the procedure itself and the potential heat-treatment.

Keywords: metallic chips, plastic consolidation, low-temperature extrusion by KOBO method, structure and mechanical properties of extrudates

1. WPROWADZENIE

Efektywny, metalurgiczny sposób recyklingu wiórów metalicznych aktualnie wprowadzany do praktyki przemysłowej, polega na zastosowaniu ich wstępnego brykietowania (zagęszczania), poprzedzającego topienie i odlewanie [1, 2]. Jednak dopiero bezpośrednia konwersja wiórów aluminiowych do postaci litego materiału/wyrobu drogą wysokotemperaturowego wyciskania brykietów, pozwala na zaoszczędzenie około 40% materiału, 26–31% energii i 16–60% nakładów pracy [3]. Z drugiej strony, skuteczna konsolidacja rozproszonych frakcji metalicznych do stanu ciała litego z pominięciem fazy ciekłej, wymaga zapewnienia odpowiednich warunków techniczno-technologicznych, przy czym kluczowym staje się zarówno dostępność, jak i techniczne możliwości ich realizacji. Niestety, konwencjonalne, wysokotemperaturowe wyciskanie wiórów, nie gwarantuje zadowalającej konsolidacji z powodu wzmożonego utlenienia powierzchni wiórów i niewystarczającego stopnia ich przerobu λ , możliwego do osiągnięcia w tym procesie. Dlatego skoncentrowano uwagę na procesach niskotemperaturowych, charakteryzujących się dużym udziałem deformacji plastycznej oraz na ewolucji cech fizycznych konsolidowanych frakcji.

Uwzględniając podstawowy cel konsolidacji, którym jest uzyskanie produktu o gęstości i własnościach metalu litego, proces do tego prowadzący musi zapewniać ściśle przyleganie stykających się, aktywnych chemicznie powierzchni. Spełnienie pierwszego wymogu (gęstość teoretyczna), dla wiórów zależy od wielkości sił ścisających (naprężenie hydrostatyczne), możliwości względnego ich przemieszczania i zdolności do

1. INTRODUCTION

The metallurgical process of recycling machining chips currently introduced into industrial practice consists of their briquetting (compacting) and subsequent melting and casting [1, 2]. However, only direct conversion of aluminum chips into solid products/compacts during the briquettes' high-temperature extrusion allows to save around 40% of the material, 26–31% energy and 16–60% labor input [3]. On the other hand, effective consolidation of dispersed metallic fractions into solid state leaving the liquid phase out requires particular technical and technological conditions, which might be unavailable or difficult to achieve. Unfortunately, conventional high-temperature extrusion of metallic chips does not guarantee their satisfactory consolidation as the chips' surface becomes excessively oxidized and the extrusion ratio λ , possible to obtain during this process, is insufficient. That is why we decided to focus on low-temperature processes based on plastic deformation and the evolution of physical properties of the consolidated fractions.

The main objective of consolidation is to obtain a product with the density and properties of a solid metal, therefore in a process during which such product is obtained chemically active, adjoining surfaces need to closely adhere to one another. Fulfilling the first condition (theoretical density) for machining chips depends on the strain force (hydrostatic stress), their possibility to relocate and plastic deformability. Even if the consolidated fraction is polluted with machining emulsion, the chemical acti-

odkształceń plastycznych. Nawet gdy konsolidowana frakcja jest zanieczyszczona emulsją wprowadzoną podczas obróbki wiórowej, aktywność chemiczną stykających powierzchni, w tym również degradację warstwy tlenkowej, można uzyskać dzięki deformacji plastycznej zmieniającej ich kształt drogą ścinania, a tym samym otwieraniu wolnych powierzchni kontaktowych poszczególnych wiórów.

Adaptacja znanych metod konsolidacji proszków do formy gotowego wyrobu obejmująca etapy prasowania i spiekania, nie spełnia oczekiwanych warunków procesu i to nie tylko ze względu na z reguły dużą różnicę wielkości ziaren proszku i wiórów. Prasowanie, w schemacie wyłącznie sił ściskających, jedynie w małym stopniu prowadzi do względnego przemieszczania się (mieszania) składników frakcji i lokalnego ścinania warstw wierzchnich (tlenki), co skutkuje porowatością „prasówki” i brakiem wiązań atomowych (powstają jedynie połączenia adhezyjne). W przeciwieństwie do tego, połączenie atomowe, wymaga zaangażowania się procesów dyfuzyjnych, w szczególności drugiego etapu konsolidacji w postaci wysokotemperaturowego spiekania, które jednak nie eliminuje porowatości wyrobu i przy braku atmosfery ochronnej, wiąże się z jego intensywnym utlenianiem wewnętrznym. Wreszcie, konsolidacja dwuetapowa (prasowanie – spiekanie) dająca produkt o silnie ograniczonych gabarytach nie spełnia oczekiwań masowej utylizacji opadów obróbki wiórowej. Stąd poszukiwania metod zapewniających równocześnie wymogi jakościowe produktu konsolidacji i spełniających funkcję technologii o wartości komercyjnej.

2. CEL BADAŃ

Zasadniczym celem badań było sprawdzenie możliwości konsolidacji odpadów poprodukcyjnych powstałych w trakcie toczenia, frezowania, wiercenia, wysokowytrzymałych stopów aluminium, drogą niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO (rys. 1) [4, 5], do postaci i cech metalu „litego”. Dodatkowo, podjęto próbę sformułowania założeń technologii procesu konsolidacji „wyrobu długiego” o zróżnic-

of the adjoining surfaces, including the degradation of the oxidized layer, can be obtained through plastic deformation, which changes their shape as a result of shear strain, opening the free contact surfaces of individual chips.

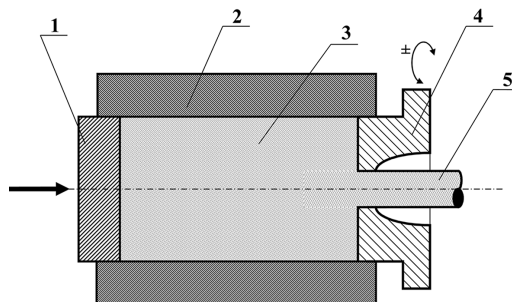
The procedure of adapting common methods of metal powder consolidation into final products, consisting of pressing and sintering, does not fulfil the required conditions, usually because of quite significant difference in the size of powder grains and metal chip grains, but not only. Pressing according to a scheme of compressing force only, leads to relative relocation (mixing) of the fraction components and localized strain of the near-surface layers to a very small degree (oxides), which results in a ‘porous’ compact and lack of atomic bonds (only adhesive bonding takes place). Atomic bonding, on the other hand, requires involvement of diffusion processes, particularly second stage of consolidation in the form of high-temperature sintering, however, even then the final product is still porous and outside blanket conditions undergoes internal oxidation of a high degree. Finally, the two-stage consolidation (pressing – sintering) resulting in a product of limited dimension, does not meet the requirements of mass utilization of machining chips. Hence, our attempts to find a solution that would provide a high value consolidation product and become a commercially useful technology.

2. RESEARCH OBJECTIVE

The main objective of the research was to study the possibility of consolidating side products of turning, milling and drilling of highly resistant aluminum alloys into the form and properties of ‘solid’ metals using low-temperature KOBO extrusion method (Fig. 1) [4, 5]. Additionally, an attempt to establish the basics of a technology enabling consolidation of ‘long products’ with various cross-sectional shapes was

wanym kształcie przekroju poprzecznego. Na te dotychczas podejmowanych prób konsolidacji frakcji rozproszonych w stanie stałym, czyli z pominięciem etapu topienia, metoda KOBO jawi się jako w pełni innowacyjny sposób utylizacji wiórów [6]. Ta cecha wynika z możliwości przeprowadzenia procesu „na zimno”.

undertaken. Among currently applied techniques of consolidation of dispersed fractions in a solid state, i.e. leaving the melting stage out, the KOBO method seems an innovative way of utilizing metallic chips [6], as it enables a ‘cold’ deformation process.



Rys. 1. Schemat wyciskania współbieżnego metodą KOBO: 1 – stempel, 2 – pojemnik, 3 – wyciskany materiał/wsad, 4 – cyklicznie obracana matryca, 5 – wyrób

Fig. 1. Scheme of concurrent KOBO extrusion: 1 – punch, 2 – container, 3 – extruded material/billet, 4 – reversibly rotating die, 5 – product

Przesłankami, które legły u podstaw zaproponowania wyciskania metodą KOBO jako najbardziej skutecznego i silnie energooszczędnego sposobu łączenia składników frakcji rozproszonych do postaci i właściwości litego materiału, są doświadczalnie stwierdzone nadzwyczaj korzystne cechy deformacji plastycznej prowadzonej na litych wsadach w warunkach „cyklicznie zmiennej drogi deformacji”. W szczególności, istotą metody KOBO jest wywołanie w kształtowanym plastycznie metalu własności nadplastycznych. Nadplastyczne płynięcie wynika ze zmiany mechanizmu deformacji plastycznej, a konkretnie ze zamiany poślizgu „dyslokacyjnego” na „pasma ścinania” (poślizg warstwowy [7]), czyli zastąpienia krystalograficznie determinowanego poślizgu dyskretnego o homogenicznej dystrybucji, przez meso- i makrozlokalizowane transziarnowe (międzykrystaliczne) ścięcia. Taka zmiana cech poślizgu następuje każdorazowo przy zmianie schematu odkształcenia plastycznego [8].

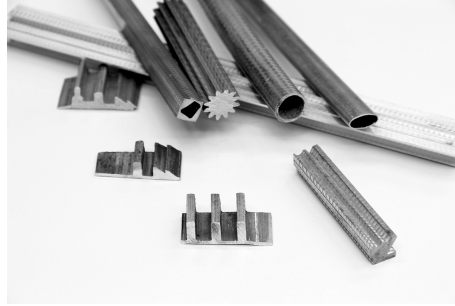
Cykliczna zmiana schematu odkształcenia, jak to ma miejsce z metodzie KOBO, pozwala na sukcesywne generowanie „warstw” o cechach lepkiej cieczy (współczynnik lepkości na poziomie 10^8 Pa·s [9]). Finalnym efektem takiego sposobu odkształcenia jest bardzo silne obniżenie

The KOBO method was put forward as the most effective and energy-saving technique of consolidating the elements of dispersed fractions into the form and properties of solids because of experimentally proven particularly favorable properties of plastic deformation conducted on solid loads under the conditions of ‘cyclic changes of deformation path’. The main objective of the KOBO method is essentially the induction of superplasticity in the deformed metal. Superplastic flow is a result of changing the mechanism of plastic deformation, namely changing ‘dislocation’ slip into ‘shear bands’ (stratified flow [7]), i.e. changing crystallographic determined discreet slip of a homogenous distribution with a meso- and macro-localized trans grain shear. Such change in the slip properties takes place whenever the plastic deformation scheme changes [8].

Cyclic change of deformation path scheme, such as in the KOBO method, allows for gradual generation of ‘layers’ with viscous fluid properties (with viscosity coefficient at the level of 10^8 Pa·s [9]). The final result of such plastic deformation is a significantly lowered global plastic resistance (low resistance to shear strain

nie globalnego oporu plastycznego (mały opór przeciw ścinaniu w lepkich warstwach) i zdolność dokładnego wypełnienia kształtu narzuczonego geometrią narzędzia – matrycy – przez „płynący” metal (niezmiennie pozostający w stanie stałym), nawet przy niskich temperaturach [10, 11] (rys. 2).

in viscous layers) and the possibility to fill the shape, determined by the tool's (die) geometry, with the 'flowing' metal (remaining in a solid state) with high accuracy, even in low temperatures [10, 11] (Fig. 2).



Rys. 2. Przykładowe wyroby otrzymane w procesie niskotemperaturowego, współbieżnego wyciskania metodą KOBO litych stopów aluminium

Fig. 2. Examples of products obtained during low-temperature, concurrent KOBO extrusion from solid aluminum alloys

Wymaganą do indukowania cech nadplastycznych zmianę schematu odkształcenia w procesie wyciskania metodą KOBO uzyskuje się poprzez rewersyjne obroty matrycy, które wywołują zbędną geometrycznie deformację postaciową (skręcanie metalu) skutkującą radialnym płynięciem metalu w warstwach (pasmach) ścinania.

W porównaniu z wysokotemperaturowym konwencjonalnym procesem wyciskania metali i stopów, stopień przerobu λ w niskotemperaturowym procesie KOBO, może osiągać wartość wyższą nawet o kilka rzędów wielkości [1, 12] (nawet $\lambda=10\ 000$). Jest to spowodowane „łatwością” plastycznego płynięcia w procesie KOBO (wartość współczynnika lepkości typowa dla stanu ciekłego [9, 10]) pod wpływem niewielkiej siły wyciskania. Zagadnienie to zostało szerzej opisane w pracach [12, 13].

Ściskanie rozdrobnionych frakcji metalicznych, w połączeniu z ich względnym przemieszczaniem poprzecznie do siły ściskania, musi prowadzić do intensywnego ścinania warstw tlenkowych i destrukcji adhezyjnie związanych zanieczyszczeń (np. cząstek emulsji). Takie właśnie warunki występują w technologii KOBO. Pozbawione tlenków i zanieczyszczeń powierzchni (atomowe) stykających się wiórów i wyni-

The change of deformation scheme in the KOBO extrusion required for the induction of superplastic properties is a result of the die reverse twisting, which leads to geometrically redundant simple shear (twisting of metal) triggering radial flow of metal in shear bands.

In comparison with conventional high-temperature extrusion of metals and alloys, the extrusion ratio λ in the KOBO method can reach the value of a couple of magnitudes higher [1, 12] (up to $\lambda=10\ 000$). It is caused by the 'ease' of plastic flow in the KOBO process (viscosity coefficient value typical for liquid states [9, 10]) resulting from low extrusion force. This problem has been described in detail in papers [12, 13].

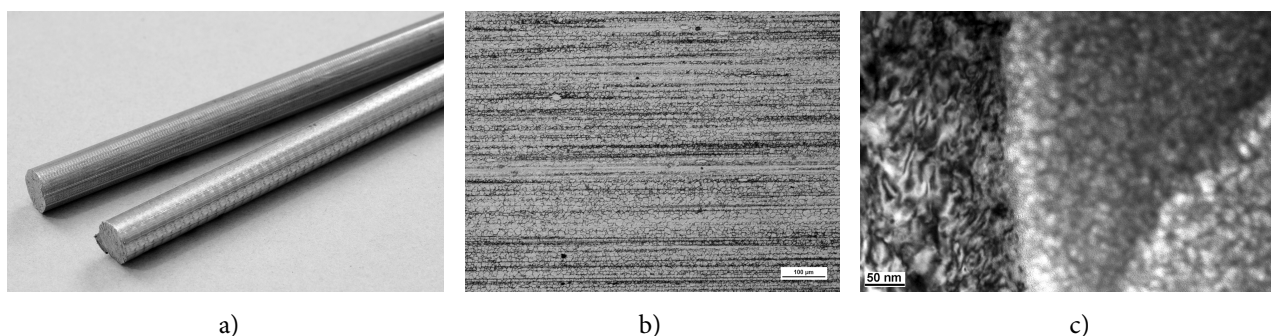
Compressing dispersed metallic fractions in combination with their relative relocations transverse to the compressing force must lead to intense shear strain in the oxidized layers and destruction of adhesively bonded pollutants (e.g. emulsion particles). The KOBO technology offers such conditions. Oxide and pollutant free (atomic) surfaces of adjoining chips and the heat resulting from friction (intensified diffusion) trig-

kające z tarcia ciepło (intensyfikacja dyfuzji) prowadzą do atomowego (metalicznego) wiązania pomiędzy wiórami, a tym samym do ich konsolidacji do stanu litego. Skutki zmiany drogi deformacji, prowadzą do intensyfikacji dyfuzji, spowodowanej generacją jej nośników (wakancje, atomy międzywęzłowe), która staje się wówczas dodatkowym mechanizmem konsolidacji w strefie metalu bezpośrednio przylegającego do matrycy (strefa nadplastycznego płynięcia radialnego).

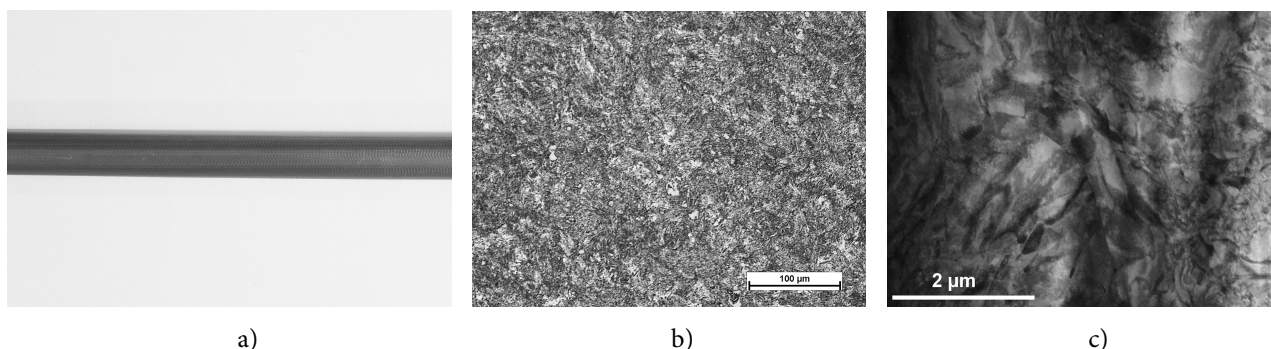
Wnioskiem z powyższej analizy może być teza, że schemat odkształcenia, jaki zapewnia metoda KOBO, umożliwi konsolidację metalicznych frakcji rozproszonych do cech i struktury litego metalu. Weryfikacja tej tezy była już przedmiotem wstępnych badań przeprowadzonych na stopach magnezu (rys. 3) i tytanu (rys. 4) [10, 14].

ger atomic (metallic) bonding between the chips, and therefore lead to their consolidation into a solid state. As a result of deformation path changes, diffusion – caused by generation of its carriers (vacant and interstitial atoms) – intensifies and becomes a consolidation mechanism in the metal layer directly adhering to die (superplastic radial flow zone).

The above can lead to a conclusion, that the deformation scheme provided by the KOBO method makes it possible to consolidate dispersed fractions into the structure and properties of a solid metal. This theory has been initially verified by research on magnesium (Fig. 3) and titanium (Fig. 4) alloys [10, 14].



Rys. 3. Wygląd (a), struktura (b) i mikrostruktura (c) pręta $\varphi=6\text{mm}$ ze stopu magnezu AZ91 otrzymanego drogą niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO wiórów odpadowych
 Fig. 3. Appearance (a), structure (b) and microstructure (c) of a magnesium AZ91 alloy $\varphi=6\text{mm}$ rod obtained as a result of low-temperature KOBO extrusion of machining chips



Rys. 4. Wygląd (a), struktura (b) i mikrostruktura (c) pręta $\varphi=8\text{mm}$ tytanu Grade 2 otrzymanego drogą niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO wiórów odpadowych
 Fig. 4. Appearance (a), structure (b) and microstructure (c) of a titanium Grade 2 alloy $\varphi=8\text{mm}$ rod obtained as a result of low-temperature KOBO extrusion of machining chips

W świetle przytoczonych argumentów uzyskanie pełnowartościowego, długiego wyrobu na drodze niskotemperaturowego wyciskania, a w szczególności wyrobu o silnie rozwiniętym przekroju poprzecznym, można uznać za dowód na skuteczną konsolidację. W tym kontekście, istotną rolę pełnią również obserwacje mikrostruktury stopów i wyniki pomiarów własności mechanicznych.

3. PROGRAM BADAŃ

Próbowi konsolidacji poddano wióry z trudnoodkształcalnych (wysokowytrzymałych) stopów aluminium serii 2xxx i 7xxx, które stanowiły odpad przemysłowy obróbki wiórowej. Skład chemiczny badanych stopów podaje tab. 1.

In the light of the aforementioned arguments, obtaining long products of high value as a result of low-temperature extrusion, particularly products with a highly developed cross-section, proves that the consolidation process is successful. Microstructural observations and measurements of mechanical properties serve as other valuable proofs.

3. RESEARCH PROGRAMME

Consolidation attempts were performed on chips from hardly deformable (highly resistant) aluminum alloys series 2xxx and 7xxx – a side product of machining. The chemical composition of the alloys are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Składy chemiczne stopów (%wag.) na bazie aluminium [15]

Tab. 1. Chemical composition of aluminum alloys (% of weight) [15]

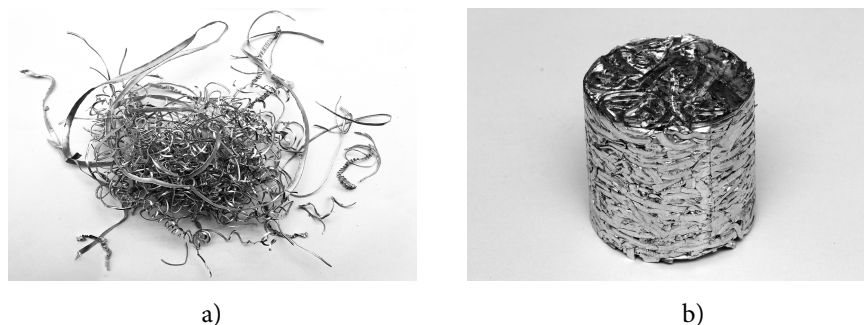
Stop / Alloy	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ni	Ti	Li
2014	0,5–1,2	0,7	3,9–5	0,4–1,2	0,2–0,8	0,1	0,25		0,15	
2024	0,5	0,5	3,8–4,9	0,3–0,9	1,2–1,8	0,1	0,25		0,15	
2099	0,05	0,07	2,4–3,4	0,05–1,2	0,05–1,2		0,4–1		0,1	1,6–2
2618	0,1–0,5	0,9–1,3	1,9–2,7		1,3–1,8		0,1	0,9–1,2	0,04–0,1	
7039	0,3	0,4	0,1	0,1–0,4	2,3–3,3	0,15–0,25	3,5–4,5		0,1	
7075	0,4	0,5	1,2–2	0,3	2,1–2,9	0,18–0,28	5,1–6,1		0,2	

Wióry powstałe w przemysłowych procesach obróbki skrawaniem, zawierały pozostałości emulsji chłodzących. Po wytworzeniu nie były poddawane żadnym operacjom czyszczenia, poza tym, że celem osuszenia przechowywano je w pomieszczeniu o niskiej wilgotności.

W pierwszym etapie eksperymentu, wióry zagęszczano. W tym celu były one zasypywano je do specjalnego pojemnika i prasowano na pionowej prasie hydraulicznej pod naciskiem 30T (ograniczenia siłowe prasy). Uzyskane brykiety o średnicy 39 mm i długości 50 mm stanowiły wsady do wyciskania metodą KOBO. Rys. 5, przedstawia postać dostarczonych do konsolidacji wiórów oraz ich formę zbrykietowaną.

Chips produced in the industrial machining processes contained remnants of cooling emulsions. They were not in any way cleansed after being produced apart from being kept in a space of low-humidity in order to get them dried out.

In the first stage of the experiment the chips were compacted – put in a special container and pressed with a vertical hydraulic press with a pressing force of 30T (force limit of the press). Briquettes obtained as a result of this procedure were 39 mm in diameter and 50 mm long and became loads for the KOBO method extrusion. Fig. 5 shows the chips before and after compaction into briquettes.



Rys. 5. Przykładowy widok wiórów ze stopu aluminium 2014 (a) oraz uzyskanego z nich brykietu (b)

Fig. 5. Example of aluminum 2014 chips (a) and their compacted form (b)

Proces konsolidacji drogą niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBÓ, przeprowadzono na prototypowej, laboratoryjnej prasie o maksymalnym nacisku 100T. W oparciu o doświadczenia uzyskane z badań procesu wyciskania litych metali i stopów, w niniejszych badaniach przyjęto kąt rewersyjnego skręcania matrycy równy $\pm 8^\circ$. Częstość oscylacji matrycy dobierano w przedziale 5–8Hz. Dla utrzymania stałej kinetyki procesu wyciskania (stała siła, stała prędkość wyciskania) częstość oscylacji matrycy była parametrem zmiennym [13]. Wyciskanie prowadzono na zimnych brykietach w temperaturze pokojowej. Prędkość wyciskania ustalono na 0,2 mm/s. Zastosowano matryce zróżnicowane co do kształtu i wielkości otworów, stwarzając szansę na uzyskanie prasówki o cechach wyrobów użytkowych. Stopień przerobu, mierzony stosunkiem powierzchni przekroju brykietu do powierzchni poprzecznej prasówki λ wynosił dla prętów $\varphi=6\text{mm}$ (stopy 2014 i 7075) $\lambda \sim 44$, dla prętów $\varphi=8\text{mm}$ (stopy 2024, 2099, 2618 i 7039) $\lambda \sim 25$. Dane dla pozostałych profili, zawarto w tab. 2. Prasówka, po opuszczeniu matrycy, była chłodzona wodą.

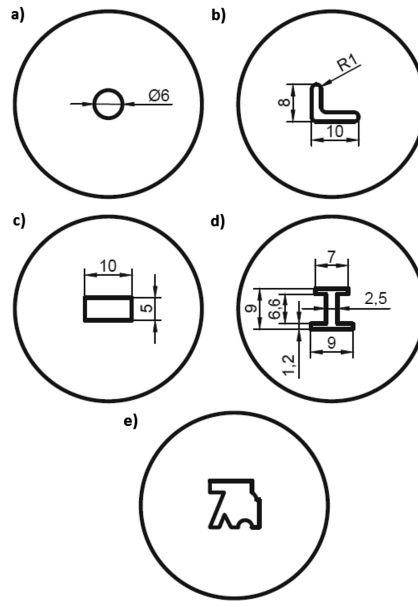
4. WYNIKI I ICH ANALIZA

Geometrie wyrobów i ich parametry ukształtowane w procesie niskotemperaturowej plastycznej konsolidacji wiórów drogą wyciskania przedstawiono na rys. 6 i w tab. 2 i 3. Zaś przykładowe charakterystyki siłowe procesu KOBÓ zamieszczono na rys. 7. Z kolei wygląd uzyskanych wyrobów z wiórów przemysłowych stopów 2014 i 7075 pokazano na rys. 8.

The low-temperature KOBÓ extrusion consolidation process was conducted on a prototype laboratory press with a maximum pressing force of 100T. Basing on experimental data obtained during research on the extrusion of solid metals and alloys, during this study the angle of the die reverse twisting was established at a level of $\pm 8^\circ$. The frequency of die oscillation was between 5–8 Hz. In order to maintain constant kinetics of the extrusion process (constant force and extrusion rate) the oscillation frequency was a changing parameter [13]. The extrusion procedure was conducted on cold, room-temperature briquettes. The established speed of extrusion was 0.2 mm/s. The dies used differed in terms of shape and size of openings, therefore making it possible to obtain compacts with the properties of appropriate goods. The extrusion ratio λ , measured by the relationship between the cross-sectional area of the billet and the transverse area of the compact was $\lambda \sim 44$ for the $\varphi 6\text{mm}$ rods (2014 and 7075 aluminum alloys) and $\lambda \sim 25$ for the $\varphi 8\text{ mm}$ rods (alloys 2024, 2099, 2618 and 7039). Data for other profiles are presented in Tab. 2. After leaving the die the extrudate was cooled by water.

4. RESULTS AND THEIR ANALYSIS

The geometry of products and their parameters obtained during the low-temperature plastic consolidation of chips by extrusion are presented in Fig. 6 and Tab. 2 and 3. Examples of force relationships in the KOBÓ process are shown in Fig. 7. Images of the products obtained from 2014 and 7075 alloy machining chips are presented in Fig. 8.



Rys. 6. Geometria profili wyciskanych metodą KOBO z wiórów ze stopów 2014: a) pręt $\varphi=6\text{mm}$; b) kątownik; c) płaskownik; d) dwuteownik; e) profil złożony; oraz stopu 7075 (a–c)

Fig. 6. Geometry of profiles extruded by the KOBO method from 2014 alloy chips: a) $\varphi=6\text{mm}$ rod; b) angle bar; c) flat bar; d) double T-bar; e) compound profile; and 7075 alloy (a–c)

Tab. 2. Geometria i profile prasówki ze stopu aluminium 2014

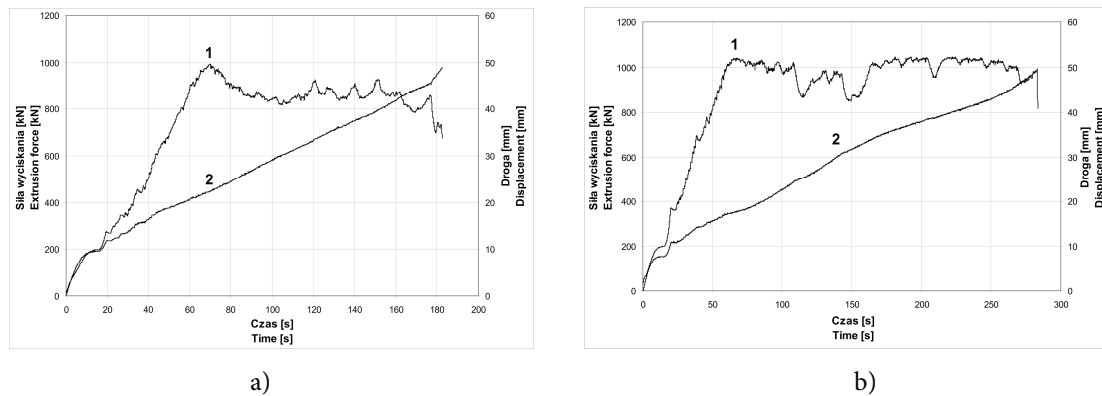
Tab. 2. Geometry and profiles of 2014 aluminum alloy extrudate

Profil / Profile	Pole powierzchni przekroju [mm^2] Cross section area [mm^2]		Stopień przerobu λ Extrusion ratio λ	Twardość HV1 Hardness HV1
	Wyrób / Product	Wsad / Billet		
Pręt / Rod	28,27	1256,64	44,45	76
Płaskownik / Flat bar	50		25,13	75
Kątownik / Angle bar	30,79		40,81	68
Złożony / Compound	57		22,05	75
Dwuteownik / Double T-bar	35,7		35,2	73

Tab. 3. Geometria i profile wyprasek ze stopu aluminium 7075

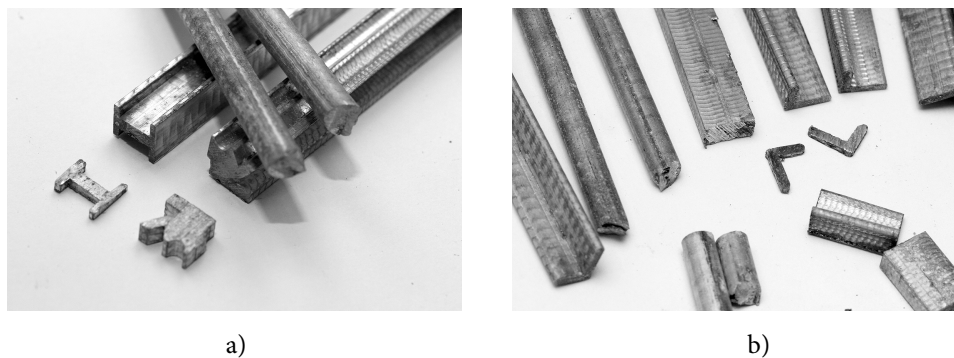
Tab. 3. Geometry and profiles of 7075 aluminum alloy extrudate

Profil / Profile	Pole powierzchni przekroju [mm^2] Cross section area [mm^2]		Stopień przerobu λ Extrusion ratio λ	Twardość HV1 Hardness HV1
	Wyrób / Product	Wsad / Billet		
Pręt / Rod	28,27	1256,64	44,45	107
Płaskownik / Flat bar	50		25,13	89
Kątownik / Angle bar	30,79		40,81	101



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki siłowe procesu konsolidacji metodą KOBO wiórów przemysłowych: a) stop 2014 prasówka w postaci dwuteownika; b) stopu 7075 prasówka w postaci kątownika; oznaczenia: 1 – siła wyciskania, 2 – droga stempla

Fig. 7. Examples of force relationships in the KOBO method industrial chip consolidation process: a) 2014 aluminum alloy extrudate in the form of double T-bar; b) 7075 aluminum alloy extrudate in the form of angle bar; symbols: 1 – extrusion force, 2 – displacement.



Rys. 8. Wygląd profili uzyskanych drogą niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO wiórów przemysłowych ze stopów aluminium: a) 2014; b) 7075

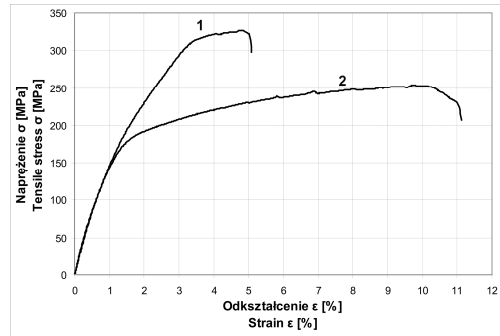
Fig. 8. Images of profiles obtained during low-temperature KOBO extrusion of industrial chips from aluminum alloys: a) 2014; b) 7075

4.1. Własności mechaniczne i mikrostruktura wyrobów/prasówki

Własności wytrzymałościowe prasówki badano w próbie rozciągania, którą przeprowadzono na próbkach z wyciśniętych prętów o przekroju kołowym. Przykładowe wykresy rozciągania prętów o średnicy 6mm (stopień przerebu $\lambda=44.45$) otrzymanych na drodze konsolidacji wiórów ze stopów aluminium 2014 i 7075 przedstawiają wykresy zamieszczone na rys. 9.

4.1. Mechanical properties and microstructure of the products

Strength properties of the extrudate were studied by tensile testing conducted on samples extruded from rods with a circular cross-section. Exemplary diagram of tensile testing for rods with 6mm diameter (extrusion ratio $\lambda=44.45$) obtained by aluminum 2014 and 7075 alloy chips consolidation are presented in Fig. 9.



Rys. 9. Krzywe rozciągania prętów $\varphi=6\text{mm}$ uzyskanych w wyniku konsolidacji metodą KOBO wiórów przemysłowych ze stopu 7075 (1) i 2014 (2)

Fig. 9. Tensile curves for $\varphi=6\text{mm}$ rods obtained by KOBO method consolidation of industrial chips from aluminum alloys 7075 (1) and 2014 (2)

Wyznaczone z próby rozciągania własności mechaniczne dla wszystkich badanych materiałów zamieszczono w tab. 4. W celu porównania, w kolejnej tabeli (tab. 5), podano cechy wytrzymałościowe aluminium stopów litych wraz z oznaczeniem stanów utwardzenia na skutek zastosowanej obróbki cieplnej.

Mechanical properties obtained as a result of tensile testing for all materials studied are shown in Tab. 4. For comparison, next table (Tab. 5) presents mechanical properties of solid aluminum alloys with hardening tempers resulting from heat-treatment marked.

Tab. 4. Własności mechaniczne prasówki uzyskanej z konsolidowanych metodą KOBO wiórów przemysłowych ze stopów aluminium

Tab. 4. Mechanical properties of extrudate obtained from aluminum alloy industrial chips consolidated by the KOBO method

Stop / Alloy	R _{0,2} [MPa] / YS [MPa]	R _m [MPa] / UTS [MPa]	A [%] / E [%]	Średnica pręta [mm] / Rod diameter [mm]
7075	313	327	5,1	6
2014	179	254	11,3	
2024	189	277	18,8	8
2099	160	174	2,4	
7039	234	278	8,0	
2618	196	255	11,4	

Tab. 5. Własności mechaniczne stopów aluminium wytworzonych drogą metalurgiczną o różnym stanie utwardzenia [15]

Tab. 5. Mechanical properties of aluminum alloys obtained by metallurgical processes with different hardening tempers [15]

Stop / Alloy	Stan / Temper	R _{0,2} [MPa] / YS [MPa]	R _m [MPa] / UTS [MPa]	A [%] / E [%]	HB
2014	0	97	168	18	45
	T4	290	427	20	105
	T6	414	483	13	135
2024	0	75	185	20	47
	T4	325	470	20	120
	T6	345	425	5	
2099	0	265	342	9,5	
	T4				
	T6	525	560	16	

Stop / Alloy	Stan / Temper	R _{0,2} [MPa] / YS [MPa]	R _m [MPa] / UTS [MPa]	A [%] / E [%]	HB
2618	0				
	T4				
	T61	372	440	10	
7039	0	103	227	22	61
	T4				
	T61	380	450	13	133
7075	0	103	228	17	60
	T4				
	T6	503	572	11	150

Opis stanów: **0** – wyżarzony; **T4** – przesycony i starzony w sposób naturalny; **T6** – przesycony i starzony sztucznie;
T61 – przesycony i starzony sztucznie w warunkach „niedostarczenia” w celu polepszenia odkształcalności.
Description of tempers: **0** – annealed; **T4** – solution heat treated and naturally aged; **T6** – solution heat treated and artificially aged;
T61 – solution heat treated and artificially aged under the conditions of ‘underageing’ in order to improve deformability.

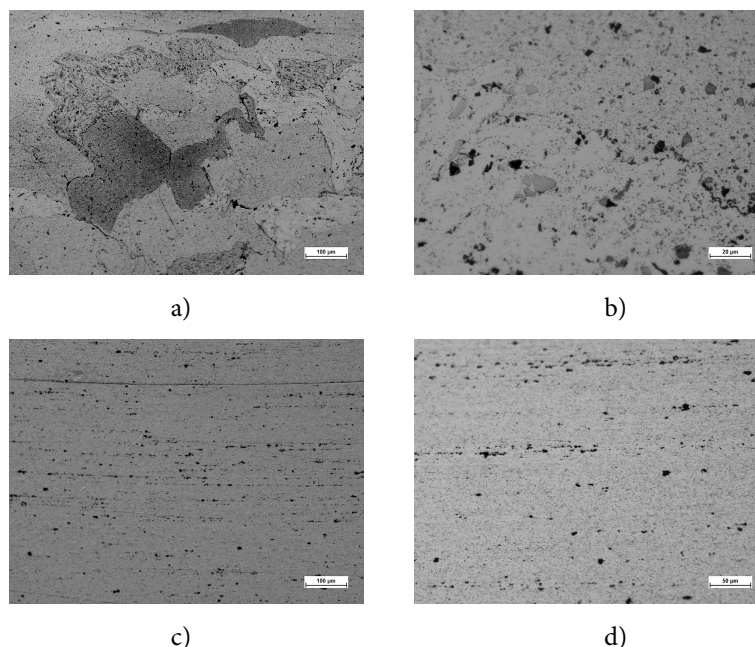
4.2. Obserwacje mikrostrukturalne

Wyniki obserwacji mikrostruktury prasówki o różnych profilach wytworzonej drogą konsolidacji wiórów ze stopu 2014 w procesie niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO, zamieszczono na rys. 10–13.

4.2. Microstructural observations

The results of microstructural observations of different profiles of the extrudate produced by aluminum alloy 2014 chips consolidation during low-temperature KOBO extrusion is presented on Fig. 10–13.

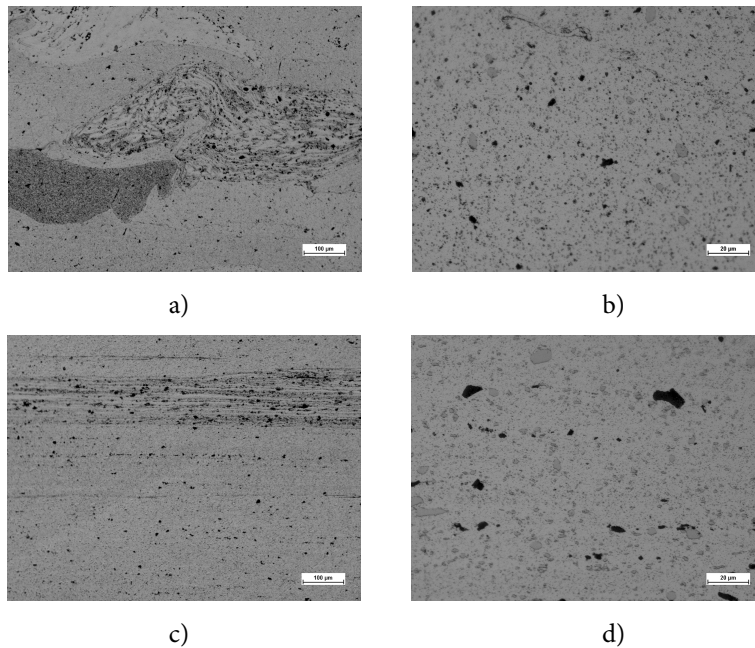
Pręt $\varnothing=6$ mm
 $\varnothing=6$ mm rod



Rys. 10. Struktury pręta $\varnothing=6$ mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 2014; stopień przerobu $\lambda=44.45$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 10. Structures of $\varnothing=6$ mm rod obtained from consolidated industrial 2014 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=44.45$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

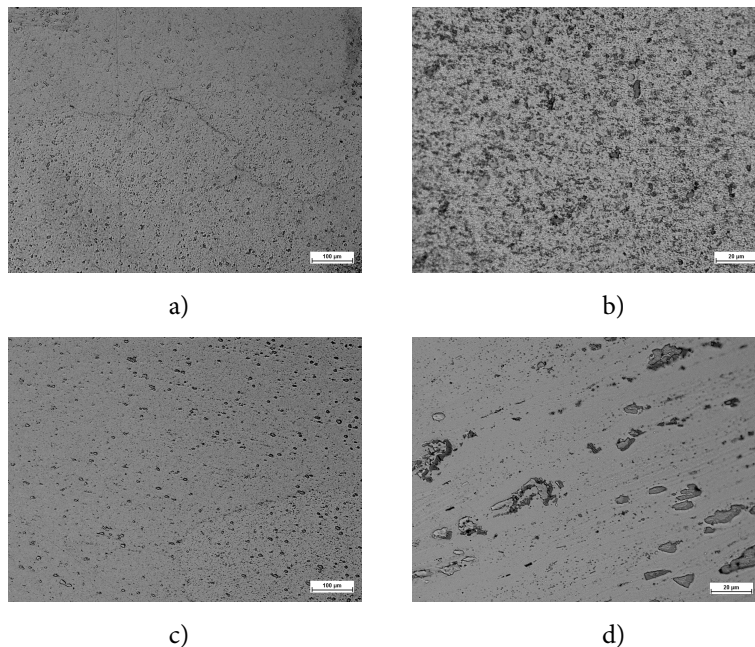
Płaskownik 10x5 mm
10x5 mm flat bar



Rys. 11. Struktury płaskownika 10x5mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 2014; stopień przerobu $\lambda=25.13$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 11. Structures of 10x5mm flat bar obtained from consolidated industrial 2014 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=25.13$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

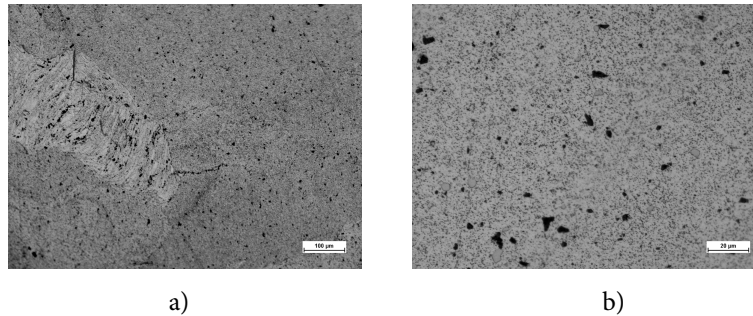
Kątownik nierównoramienny 10x8x2 mm
Non-isosceles angle bar 10x8x2 mm



Rys. 12. Struktura kątownika nierównoramiennego 10x8x2 mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 2014; stopień przerobu $\lambda=40.81$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 12. Structure of non-isosceles angle bar 10x8x2 mm obtained from consolidated industrial 2014 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=40.81$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

Profil złożony
Compound profile



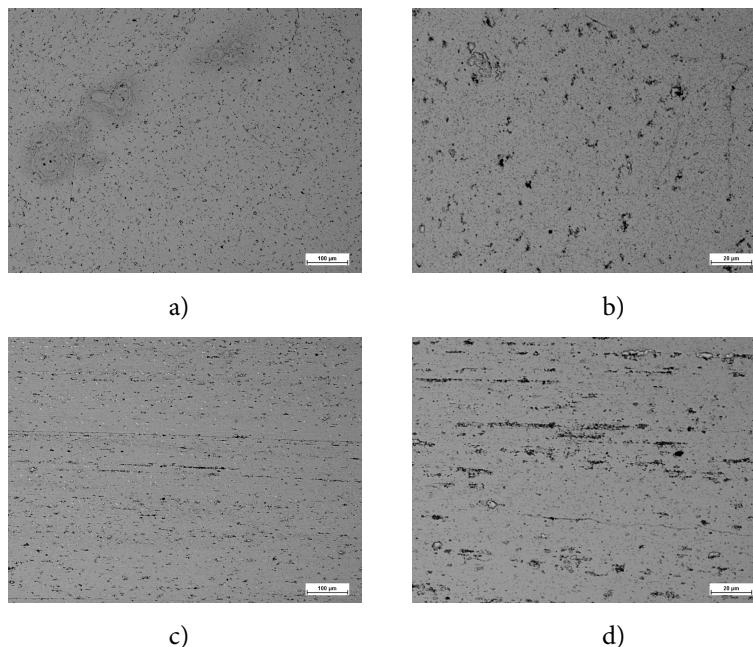
Rys. 13. Struktury profilu złożonego uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 2014; stopień przerobu $\lambda=22,05$; przekrój poprzeczny (a, b)

Fig. 13. Structure of compound profile obtained from consolidated industrial 2014 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=22.05$; cross-section (a, b)

Wyniki obserwacji mikrostruktury prasówki o różnych profilach wytworzonej drogą konsolidacji wiórów ze stopu 7075 w procesie niskotemperaturowego wyciskania metodą KOBO, zamieszczono na rys. 14–16.

The results of microstructural observations of different profiles of the compact produced by aluminum alloy 7075 chips consolidation during low-temperature KOBO extrusion are shown in Fig. 14–16.

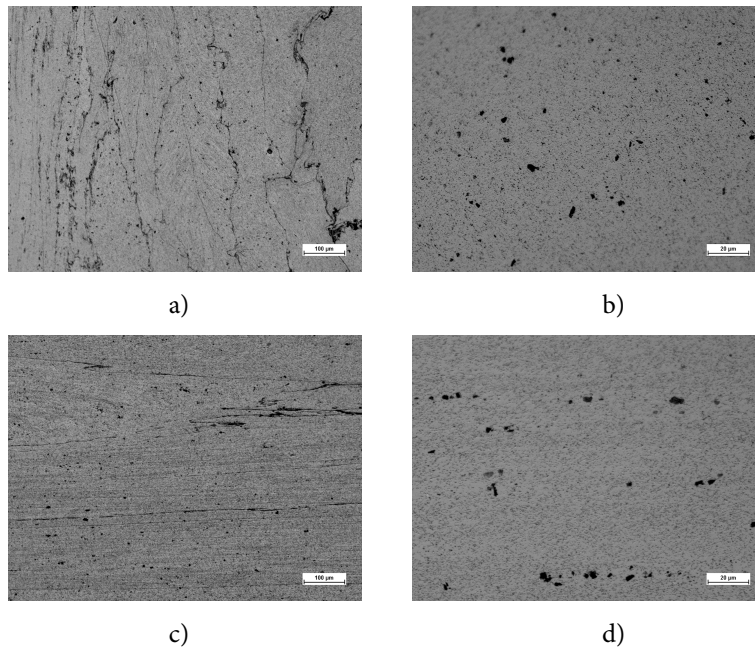
Pręt $\varnothing=6$ mm
 $\varnothing=6$ mm rod



Rys. 14. Struktury pręta $\varphi=6$ mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 7075; stopień przerobu $\lambda=44,45$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 14. Structures of $\varphi=6$ mm rod obtained from consolidated industrial 7075 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=44.45$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

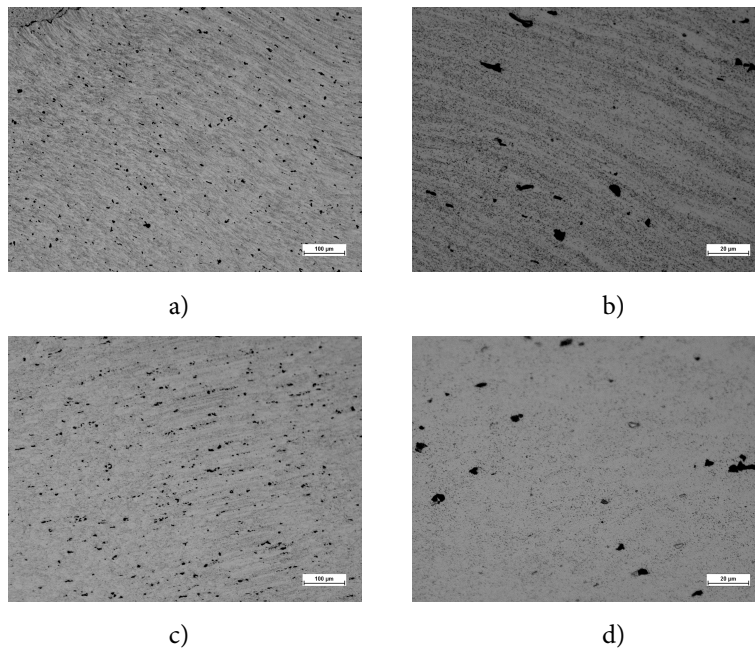
Płaskownik 10x5 mm
10x5 mm flat bar



Rys. 15. Struktury płaskownika 10x5mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 7075; stopień przerobu $\lambda=25,13$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 15. Structures of 10x5mm flat bar obtained from consolidated industrial 7075 aluminum alloy chips extrusion ratio $\lambda=25.13$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

Kątownik nierównoramienny 10x8x2 mm
Non-isosceles angle bar 10x8x2 mm



Rys. 16. Struktury kątownika nierównoramiennego 10x8x2 mm uzyskanego ze skonsolidowanych wiórów przemysłowych stopu 7075; stopień przerobu $\lambda=40,81$; przekrój poprzeczny (a, b); przekrój wzdłużny (c, d)

Fig. 16. Structures of non-isosceles angle bar 10x8x2 mm obtained from consolidated industrial 7075 aluminum alloy chips; extrusion ratio $\lambda=40.81$; cross-section (a, b); longitudinal section (c, d)

Przedstawiony zestaw wyników badań procesu wyciskania metodą KOBO wiórów trudnoodkształcalnych, wysokowytrzymałych stopów na osnowie aluminium oraz cech mechanicznych i strukturalnych skonsolidowanych wyrobów/prasówki, umożliwia ich wieloaspektową ocenę. Bez względu na to, że urządzenia, jakimi dysponowano do sprawdzenia przyjętej koncepcji, silnie ograniczały zarówno wstępne zagęszczenie brykietów, jak i przebieg procesu wyciskania, uzyskane wyniki należy uznać za pozytywną weryfikację zaproponowanej metody. Trzydziestotonowy nacisk prasy użytej do brykietowania wiórów, dawał dalekie od możliwego do osiągnięcia na tej drodze zagęszczenia brykieta. Pomiar gęstości brykieta ze stopu 2014, skonfrontowany z gęstością litego stopu, dowodził, że udział wolnych przestrzeni wynosił 18,5%. Wynik dla brykieta ze stopu 7075 dał wynik na poziomie 25,3%. Mimo tak dużej porowatości brykietów i jej zróżnicowania, produkty wyciskania odwzorowały dokładnie geometrię narzędzia (matrycy), bez względu na rodzaj, skład chemiczny i stan fizyczny (własności wytrzymałościowe) wiórów, dowodząc konsolidacji na poziomie atomowym. Bowiem, jedynie wówczas możliwe jest wymuszenie cech nadplastycznych deformacji w agregacie polizarnowym.

Charakterystyki mechaniczne prasówki, prowadzą do podobnego wniosku. Krzywe rozciągania ujawniają typowe dla stopów zjawisko Portevin-LeChatelier, a poziom własności ($R_{0.2}$, R_m i A , HV1) mieści się w przedziale wartości typowych dla danego stopu w postaci litej – a konkretnie pomiędzy własnościami stopu po przesyleniu (stan 0), a stanem po starzeniu naturalnym (stan T4). Nie stwierdzono „kruchego” pęknięcia próbek.

Jak pokazują doświadczenia [9, 16], własności metali (prasówki) wyciśniętych metodą KOBO zależą od stopnia przerobu, prędkości wyciskania oraz kąta i częstości oscylacji matrycy, czyli innymi słowy są obok rodzaju stopu, pochodną przyjętych parametrów wyciskania. W tym kontekście, wyniki uzyskane w ramach przeprowadzonych badań nie mogą być uznane za optymalne ponieważ dotyczą ograniczonego zespołu parametrów wyciskania KOBO. Poza tym wyciskane stopy należą do grupy sto-

The aforementioned set of results regarding the KOBO extrusion of hardly-deformable metallic chips from highly-strength aluminum based alloys and the mechanical and structural properties of the consolidated products/compact enables their multi-faceted assessment. Regardless of the fact that the equipment used for verification of the concept was very limiting in terms of both, the briquettes initial densification and the extrusion process, the obtained results indicate that the proposed method is correct. The 30 T force of the press used for compacting the chips meant that the briquettes (compacts) density value was far from the value possible to obtain in this way. The comparison between 2014 aluminum alloy briquette's density measurement and the one of a solid alloy proved that the share of free spaces was 18.5 %. Similar measurement for the 7075 alloy resulted in the value of 25.3 %. Despite such high and diverse porosity of the briquettes, the extrudates accurately mapped the geometry of the tool (die), regardless of the type, chemical composition and physical state (durability properties) of chips, proving consolidation on an atomic level. Only then is it possible to force superplastic properties in a polycrystalline aggregate.

Descriptions of the compact's mechanical properties lead to a similar conclusion. Tensile curves indicate a typical for alloys Portevin-LeChatelier phenomenon and the property level (UTS, YS, E and HV1) fits into the interval of values typical for a given alloy in the solid state – and specifically between the values after the alloy's saturation and before its natural ageing (T4 temper). 'Brittle' fractures of samples were not recorded.

As shown by experiments [9, 16], the properties of metals (compact) extruded by the KOBO method depend on the extrusion ratio, extrusion rate and the angle as well as frequency of the die oscillation, so, in other words, they are – similarly to the type of alloy – a derivative of set extrusion parameters. In this context, the results of the conducted studies cannot be treated as optimal because they refer to a limited number of KOBO extrusion parameters. Apart from that, the extruded alloys belong to a group of pre-

pów utwardzalnych wydzieleniowo i ich właściwości użytkowe zazwyczaj wymagają odpowiednio dobranej obróbki cieplnej.

Obserwacje mikrostruktury stopów wskazują na wpływ stopnia przerobu. Istotna, z punktu widzenia konsolidacji obecność lokalnej nieciągłości materiału, ujawniona została jedynie w przypadku płaskownika ze stopu Al 7075, dla którego stopień przerobu był najmniejszy ($\lambda=25,13$). W mikrostrukturze prasówek ze stopniem przerobu $\lambda>40$ żadnych nieciągłości nie stwierdzono. Pojawiły się natomiast, charakterystyczne dla technologii KOBO, „zakrzywione” linie płynięcia, szczególnie wyraźnie widoczne w strukturze kątownika.

Rekapitulując wyniki przeprowadzonych doświadczeń, pomiarów i obserwacji, można stwierdzić, że zaproponowana metoda konsolidacji spełnia wymagania odnośnie cech geometrycznych, wytrzymałościowych i strukturalnych litych stopów aluminium. W stosunku do innych metod jawi się jako w pełni innowacyjna, energooszczędna i technologicznie atrakcyjna (proces na zimno). Jej zastosowanie na zaadoptowanych do procesu KOBO pełnogabarytowych prasach przemysłowych, umożliwi uzyskiwanie wyrobów o większych przekrojach poprzecznych i większym stopniu przerobu, a także pozwoli na sterowanie własnościami wyrobu przez odpowiedni dobór parametrów prowadzenia procesu i ewentualnej obróbki cieplnej.

Uzyskanie profili o różnych kształtach miało na celu udowodnienie uzyskania podczas konsolidacji własności materiału litego. Wytworzone profile są nieosiągalne na drodze niskotemperaturowego wyciskania w sposób konwencjonalny. Cechy globalne materiału (własności mechaniczne) są istotniejsze niż lokalna struktura określana drogą obserwacji przy użyciu mikroskopu elektronowego.

5. WNIOSKI

1. Metoda KOBO umożliwia pełną konsolidację rozproszonych frakcji (wiórów) trudnoodkształcalnych stopów aluminium.

cipitation/age hardened alloys and their practical properties usually rely on a relevant heat-treatment conditions.

Microstructural observations of alloys indicate the influence of extrusion ratio. Local intermittency of the material, important for consolidation, was determined only in the case of 7075 aluminum alloy flat bar, the throughput of which was the lowest ($\lambda=25.13$). In the compacts with extrusion ratio $\lambda>40$ no intermittency was found. However, in these cases ‘curved’ flow lines – typical for the KOBO technology – were recorded, which were particularly visible in the bevel’s structure.

To recap the results of the conducted experiments, measurements and observations, it is fair to say that the proposed method of consolidation meets the requirements regarding geometrical, mechanical and structural properties for aluminum alloys. In comparison with other methods, it seems innovative, energy-saving and technologically attractive (cold process). The method’s application on specially adapted full-size industrial presses makes it possible to obtain products with bigger cross-sectional areas and higher extrusion ratio, also allowing to control the properties of products through a relevant choice of parameters for the procedure itself and the potential heat-treatment.

Obtaining profiles with a variety of shapes was aimed at proving that properties of a solid metal are reached during consolidation. The profiles produced cannot be obtained by conventional low-temperature extrusion. Global (mechanical) properties of the material are more important than its local structure determined by electron microscopy.

5. CONCLUSIONS

1. The KOBO method allows to fully consolidate fractions (chips) from hardly-deformable aluminum alloys.

2. Pozwala na uzyskanie wyrobów „długich” o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego (profile).
 3. Umożliwia kształtowanie wyrobów „na zimno”, bez względu na skład chemiczny, własności wytrzymałościowe stopu i postać wiórów.
 4. Zapewnia własności i strukturę wyrobów odpowiadającą litemu stopowi.
 5. Ujawnia olbrzymi potencjał technologiczny, łatwość adaptacji do warunków przemysłowych i szeroki zakres możliwości sterowania procesem (amplituda i częstość oscylacji matrycy, prędkość wyciskania, stopień przerobu, a dodatkowo temperatura).
2. *It makes it possible to obtain 'long' products with any cross-sectional shape (profile).*
 3. *It enables 'cold' deformation of products, regardless of chemical composition, durability and form of chips.*
 4. *Ensures solid metal properties and structure of the products.*
 5. *It has an enormous technological potential, can be easily adapted to industrial conditions and gives a wide spectrum of possibilities to control the process (amplitude and frequency of die oscillation, extrusion rate, extrusion ratio and temperature).*

PODZIĘKOWANIA

Praca została zrealizowana w ramach projektu: „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w ramach programu Innowacyjna Gospodarka”.

ACKNOWLEDGEMENTS

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”, No. POIG.01.01.02-00-015/08-00 is gratefully acknowledged.

LITERATURA

- [1] Tucholski G. 2013. “Chips versus briquetts: How the aluminium industry can effectively and efficiently recycle scrap”. *Aluminium* 1-2: 87-88.
- [2] Torkar M., M. Lamut, A. Millaku. 2010. “Recycling of steel chips”. *Materials and Technology* 44: 289-292.
- [3] Gronostajski J., H. Marciniak, A. Matuszak. 2000. “New methods of aluminium and aluminium – alloy chips recycling”. *Journal of Materials Processing Technology* 106: 34-39.
- [4] Korbel A., W. Bochniak. Method of plastic forming of materials. U.S. Patent No. 5,737,959 (1998), European Patent No 0711210 (2000).
- [5] Korbel A., W. Bochniak. 2004. “Refinement and control of the metal structure elements by plastic deformation”. *Scripta Materialia* 51: 755-759.
- [6] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, M. Łagoda. 2015. “Warunki inicjacji procesu konsolidacji wiórów ze stopów magnezu poddanych niskotemperaturowemu wyciskaniu metodą KOBO”. *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling* 60: 734-740.
- [7] Korbel A., W. Bochniak. 2016. Stratified plastic flow in metals. (Złożone do publikacji).

REFERENCES

- [1] Tucholski G. 2013. “Chips versus briquetts: How the aluminium industry can effectively and efficiently recycle scrap”. *Aluminium* 1-2: 87-88.
- [2] Torkar M., M. Lamut, A. Millaku. 2010. “Recycling of steel chips”. *Materials and Technology* 44: 289-292.
- [3] Gronostajski J., H. Marciniak, A. Matuszak. 2000. “New methods of aluminium and aluminium – alloy chips recycling”. *Journal of Materials Processing Technology* 106: 34-39.
- [4] Korbel A., W. Bochniak. Method of plastic forming of materials. U.S. Patent No. 5,737,959 (1998), European Patent No 0711210 (2000).
- [5] Korbel A., W. Bochniak. 2004. “Refinement and control of the metal structure elements by plastic deformation”. *Scripta Materialia* 51: 755-759.
- [6] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, M. Łagoda. 2015. “Warunki inicjacji procesu konsolidacji wiórów ze stopów magnezu poddanych niskotemperaturowemu wyciskaniu metodą KOBO”. *Rudy i Metale Nieżelazne Recykling* 60: 734-740.
- [7] Korbel A., W. Bochniak. 2016. Stratified plastic flow in metals. (Submitted for publication).

- [8] Cottrell A.H. 1964. *The Mechanical Properties of Matter*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [9] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. „Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme”. *Metallurgical and Materials Transactions* 42: 2881–2897.
- [10] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski. 2015. Correlation between nanostructure and mechanical properties of metals subjected to Severe Plastic Deformation, 17–18. *W mat. konf. 2nd Edition Nanotech Dubai 2015 International Conference & Exhibition NANOTECH DUBAI 2015*. Dubai, United Arab Emirates.
- [11] Bochniak W., A. Korbel. 2014. Viscous flow of light alloys subjected to large strain at low temperature, 16–18. *W mat. konf. The Twentieth International Symposium on Plasticity and its Current Applications PLASTICITY 2014*, Bahamas.
- [12] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski. 2013. „Wyciskanie metali i stopów metodą KOBO”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (2): 83–97.
- [13] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, A. Paliborek, M. Łagoda, A. Brzostowicz. 2016. „A new constitutive approach to large strain plastic deformation”. *International Journal of Materials Research* 107: 44–51.
- [14] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, M. Łagoda. 2016. *Warunki wyciskania wiór z tytanu w gatunku Grade 2*. *W przygotowaniu do publikacji*.
- [15] *ASM Metals Handbook*. Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 1990. ASM International.
- [16] Bochniak W., K. Marszowski, A. Korbel. 2005. “Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method”. *Journal of Materials Processing Technology* 169: 44–53.
- [8] Cottrell A.H. 1964. *The Mechanical Properties of Matter*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- [9] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, L. Błaż. 2011. „Visco-Plastic Flow of Metal in Dynamic Conditions of Complex Strain Scheme”. *Metallurgical and Materials Transactions* 42: 2881–2897.
- [10] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski. 2015. Correlation between nanostructure and mechanical properties of metals subjected to Severe Plastic Deformation, 17–18. *W mat. konf. 2nd Edition Nanotech Dubai 2015 International Conference & Exhibition NANOTECH DUBAI 2015*. Dubai, United Arab Emirates.
- [11] Bochniak W., A. Korbel. 2014. Viscous flow of light alloys subjected to large strain at low temperature, 16–18. *In proceedings of. The Twentieth International Symposium on Plasticity and its Current Applications PLASTICITY 2014*, Bahamas.
- [12] Bochniak W., A. Korbel, P. Ostachowski, S. Ziółkiewicz, J. Borowski. 2013. „Wyciskanie metali i stopów metodą KOBO”. *Obróbka Plastyczna Metali* 24 (2): 83–97.
- [13] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, A. Paliborek, M. Łagoda, A. Brzostowicz. 2016. „A new constitutive approach to large strain plastic deformation”. *International Journal of Materials Research* 107: 44–51.
- [14] Korbel A., W. Bochniak, P. Ostachowski, M. Łagoda. 2016. *Warunki wyciskania wiór z tytanu w gatunku Grade 2*. *In preparation for publication*.
- [15] *ASM Metals Handbook*. Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 1990. ASM International.
- [16] Bochniak W., K. Marszowski, A. Korbel. 2005. “Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method”. *Journal of Materials Processing Technology* 169: 44–53.

