

PORÓWNANIE MIKROSTRUKTURY I WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ŻELIWA SFEROIDALNEGO AUSFERRYTYCZNEGO ORAZ STALI PODDANYCH DYNAMICZNEJ DEFORMACJI W TEŚCIE TAYLORA

THE COMPARISON OF THE MICROSTRUCTURE AND THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AUSTEMPERED DUCTILE CAST IRON AND STEEL SUBJECT TO DYNAMIC DEFORMATION USING THE TAYLOR TEST

Dawid Myszką, Tadeusz Cybula

*Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa
Warsaw University of Technology, Faculty of Production Engineering, ul. Narbutta 85, 02-524 Warsaw*

E-mail: d.myszka@wip.pw.edu.pl

Streszczenie

W artykule podjęto próbę porównania odporności na dynamiczne obciążenia żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego i stali S215. Próbki poddano badaniom z zastosowaniem metodyki testu Taylora przy różnych prędkościach odkształcenia, w celu określenia charakterystycznych cech materiałowych (rys. 1). Stwierdzono znaczny wzrost twardości w obszarach silnie zdeformowanych oraz zmiany w mikrostrukturze wskazujące na umocnienie materiału. Określono, iż badane właściwości są porównywalne w stali i w żeliwie po obróbce cieplnej na podstawie oceny dynamicznej granicy plastyczności oraz współczynnika umocnienia. Wyniki badań obu materiałów mogą służyć do oceny ich przydatności do produkcji części urządzeń eksploatowanych w ekstremalnych warunkach obciążenia.

Słowa kluczowe: żeliwo sferoidalne ausferrytyczne, dynamiczne odkształcenie, umocnienie, austenit

Abstract

The article attempts to compare the resistance of austempered ductile cast iron and S215 steel to dynamic loads. The samples were subject to research using the Taylor test methodology at different speeds of deformation, in order to determine the characteristics of the material (Fig. 1). There was a significant increase in hardness in the highly deformed areas, and changes in the microstructure indicating the strengthening of the material. It was determined that the studied properties are comparable in steel and in iron after heat treatment on the basis of assessment of dynamic yield limit and the strengthening coefficient. The results of both materials may be used to assess their suitability for the production of equipment operating under extreme load conditions.

Keywords: austempered ductile cast iron, dynamic deformation, strengthening, austenite

Wprowadzenie

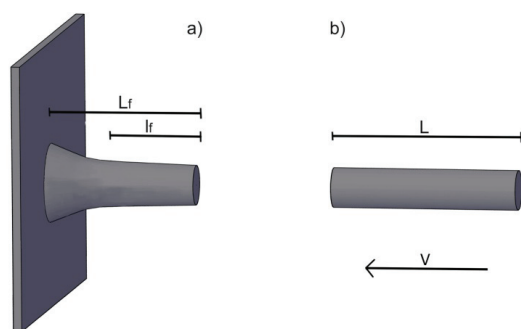
Materiałom stosowanym w przemyśle rolniczym, górniczym, specjalnym, etc. stawiane są coraz to nowe wymagania – należy do nich również odporność na dynamiczne obciążenia. Ze względu na złożoność zjawisk podczas tego typu oddziaływań materiały poddawane są specyficznym, innym niż statyczne, rodzajom badań. Określają one właściwości w sposób pozwalający na nowo charakteryzować znany już materiał i pozwalają znaleźć dla niego nowe zastosowania. Jednym z takich specjalnych rodzajów badań jest test Taylora, w którym wyznacza się dynamiczną

Introduction

The materials used in agricultural, mining, special industries, etc., have to meet more and more demands to which also belongs the resistance to dynamic loads. Due to the complexity of the phenomenon during this type of interaction, materials are subject to specific types of tests. They define the properties in a way that allows re-characterizing the already known material which allows finding new uses for it. One of these special types of tests is the Taylor test during which the dynamic yield limit is determined [1, 2]. It is

granicę plastyczności [1, 2]. Jest on niezwykle przydatny ze względu na możliwość szerokiego porównania z innymi materiałami oraz możliwość przełożenia jego wyników na aplikacyjne możliwości badanego materiału.

Test Taylora zakłada dynamiczną deformację cylindrycznej próbki, która uderza z założoną prędkością w nieodkształcalną przegrodę (rys. 1). Parametry uderzenia oraz stopień deformacji próbki, który jest możliwy do określenia za pomocą geometrycznych pomiarów, jest miarą dynamicznych właściwości badanego materiału. Zastosowanie wyznaczonych w teście parametrów uderzenia oraz stopnia deformacji próbki do zależności (1) podanej przez Taylora pozwala na wyznaczenie tzw. dynamicznej granicy plastyczności. Zależność ta umożliwi porównanie różnych materiałów w warunkach dynamicznych obciążeń.



$$R_d = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2 \left(1 - \frac{l_f}{L}\right)}{\left(1 - \frac{L_f}{L}\right) \ln\left(\frac{L}{l_f}\right)} \quad (1)$$

Rys. 1. Założenia testu Taylora: a) próbka po deformacji, b) próbka przed deformacją; zależność (1), gdzie: R_d – dynamiczna granica plastyczności, ρ – gęstość materiału, V – prędkość uderzenia próbki, L – długość próbki przed uderzeniem, L_f – długość próbki po uderzeniu, l_f – długość nieodkształconej części próbki po uderzeniu [2]

Fig. 1. Taylor Test Assumptions: a) sample after deformation, b) sample before deformation; dependence (1), where: R_d – dynamic yield limit, ρ – material density, V – speed of hitting the sample, L – length of the sample before the hit, L_f – length of the sample after the hit, l_f – length of the undeformed part of the sample after the hit [2]

Żeliwo sferoidalne ausferrytyczne

W dzisiejszych czasach znane są nowoczesne gatunki żeliwa (np. żeliwo sferoidalne ausferrytyczne, żeliwo wermikularne) znakomicie konkurujące ze stalą lub przewyższające ją swoimi unikalnymi właściwościami [3, 4, 5]. Gęstość o 10% mniejsza od stali, zdolność tłumienia drgań, odporność na obciążenia udarowe, wytrzymałość na rozciąganie sięgająca 1700 MPa, doskonała odporność na zużycie, odporność na korozję, możliwość kształtowania wyrobów o dowolnym kształcie metodami odlewniczymi itd. Pozwalają myśleć o tym materiale jako o alternatywie dla wielu rozwiązań. W świetle nowych badań żeliwo sferoidalne ausferrytyczne posiada unikalną cechę dynamicznego „reagowania” na zadane obciążenia [6]. Cecha ta związana jest z obecnością w jego mikrostrukturze metastabilnego austenitu, który ulega efektowi TRIP (ang. *TRansformation Induced Plasticity*) [7]. Efekt ten nie został do końca zbadany w żelwie, jednak teoretyczne podstawy oraz wyniki badań kilku autorów z Polski, Anglii oraz

Ausferritic ductile cast iron

Nowadays, modern types of iron are known (e.g. austempered ductile cast iron, vermicular graphite iron) competing very well with steel or exceeding its unique properties [3, 4, 5]. With a density of 10% less than steel, the ability to reduce vibrations, impact resistance, tensile strength reaching 1700 MPa, excellent wear resistance, corrosion resistance, the possibility to form products of any shape by casting, etc. allow us to think of this material as an alternative to many solutions. In the light of new research austempered ductile cast iron has a unique feature of giving dynamic “response” to given loads [6]. This feature is connected with the presence of metastable austenite in its microstructure, which undergoes the TRIP effect (*TRansformation Induced Plasticity*) [7]. This effect has not been thoroughly researched yet in cast iron but theoretic bases and the results of studies by a few authors from Poland, England and Spain suggest that it will have great importance from the point of view of the unique characteristics of the material [8, 9, 10].

Hiszpanii pozwalają sądzić, że będzie on miał duże znaczenie z punktu widzenia unikalnych właściwości tego materiału [8, 9, 10].

Wykonanie próbek

Badaniom poddano próbki walcowe $\varnothing 8 \times 30$ mm ze stali i żeliwa o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1. Obróbka cieplna dla próbek z żeliwa została zrealizowana z wykorzystaniem pieca komorowego Nabertherm oraz złoża fluidalnego na bazie SiC o wielkości ziarna około 100 μm w Zakładzie Odlewnictwa Politechniki Warszawskiej. Żeliwo było austenitzowane w temperaturze 900°C w czasie 60 minut, a następnie hartowane izotermicznie w temperaturze 370°C w czasie 60 minut (materiał oznaczono: ADI_370_060).

Sampling

The research covered cylindrical samples $\varnothing 8 \times 30$ mm made of steel and cast iron, whose chemical composition is presented in Table 1. The heat treatment of cast iron samples was performed with the use of Nabertherm chamber furnace and fluidized bed based on SiC having particle size of about 100 μm in the Department of Casting of the Warsaw University of Technology. The cast iron was austenitized in 900°C for 60 minutes, and then subject to isothermal quenching in 370°C for 60 minutes (material marked: ADI_370_060).

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów poddanych badaniom, % wag.

Table 1. Chemical composition of the tested materials, % of weight.

Material/oznaczenie Material/mark	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mg	Cu	Mo
Żeliwo/ADI_370_060 Cast iron/ADI_370_060	3,40	2,80	0,28	0,035	0,015	0,02	0,055	0,72	0,27
Stal/S215 Steel/S215	0,15	0,33	1,00	0,030	0,025	0,10	-	0,10	-

Tabela 2. Właściwości mechaniczne materiałów poddanych badaniom

Table 2. Mechanical properties of the tested materials

Oznaczenie/Mark	Wytrzymałość na rozciąganie / Tensile strength	Umowna granica plastyczności / Agreed yield limit	Wydłużenie/ Elongation	Twardość/Hardness
	R_m , MPa	$R_{p0,2}$, MPa	A_5 , %	HB
ADI_370_060	961	584	15,7	313
S215	471	380	18,4	181

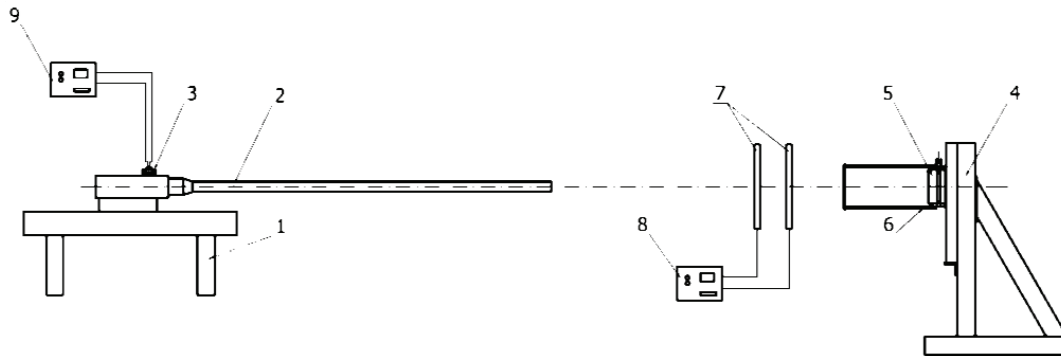
Wyniki testu Taylora

Do wyznaczenia dynamicznej granicy plastyczności żeliwa sferoidalnego ausferytycznego wykorzystano stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 2. Stanowisko składa się z uniwersalnego przyrządu balistycznego (UPB) – (1), na którym zamontowano prochowy układ miotający – (2). W przedniej części stanowiska znajduje się układ wychwytywania próbki – (4), zestaw bramek fotoelektrycznych – (7) oraz rejestrator prędkości uderzenia próbki w „kowadło” – (8). Przebieg ciśnienia gazów prochowych w układzie miotającym rejestrowany jest przez rejestrator ciśnienia – (9). Układ miotający ma za zadanie nadanie próbce wymaganej prędkości wylotowej. W układzie do miotania wykorzystano lufę balistyczną 12,7 \times 99 mm o zmniejszonej długości

Taylor test results

To determine the dynamic yield limit of the austempered ductile cast iron the scientific stand presented in Figure 2 was used. The stand includes a universal ballistic instrument – (1), on which gunpowder propellant system is mounted – (2). In the front part of the stand there is a sample capture system – (4), a set of photoelectric gates – (7) and the impact speed of the sample recorder – (8). The layout of the gunpowder gases in the propellant system is recorded by the pressure recorder – (9). The propellant system is designed to give the sample the required discharge speed. In the propellant system a ballistic barrel 12.7 \times 99 mm was used but the threaded part was shortened. The capture system included: resistive frame – (4) and "anvil" – (5) rigidly connected to the resistive plate.

części gwintowanej. W skład układu wychwytyjącego wchodzi: rama oporowa – (4) oraz „kowadło” – (5) sztywno połączone z płytą oporową.



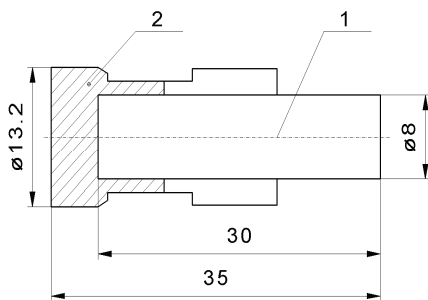
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego do wyznaczania dynamicznej granicy plastyczności:

1 – łożo UPB, 2 – 12,7 mm układ miotający, 3 – piezoelektryczny czujnik ciśnienia, 4 – rama do mocowania „kowadła”, 5 – „kowadło”, 7 – zestaw bramek fotoelektrycznych, 8 – rejestrator prędkości, 9 – rejestrator ciśnienia gazów prochowych

Fig. 2. A scheme of the scientific stand used for determining the dynamic yield limit:

1 – the bed of the universal ballistic instrument, 2 – 12.7 mm propellant system, 3 – piezoelectric pressure sensor, 4 – „anvil” frame, 5 – „anvil”, 7 – a set of photoelectric gates, 8 – speed recorder, 9 – pressure of gunpowder gases recorder

W badaniu wykorzystano specjalnie skonstruowane naboje rozdzielnego ładowania. Nabój taki składał się z: zaspłonkowanej łuski z umieszczonym wewnątrz ładunkiem miotającym oraz pocisku badawczego. Pocisk badawczy (rys. 3) składał się z sabotu (2) wykonanego z tworzywa sztucznego oraz próbki (1) wykonanej z badanego materiału umieszczonej wewnątrz sabotu.

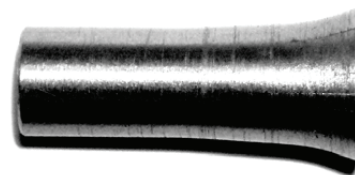


Rys. 3. Pocisk badawczy: 1 – próbka, 2 – sabot

Fig. 3. Research bullet: 1 – sample, 2 – sabot

Przedmiotem badań były 4 próbki wykonane z żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego i stali S215 – po 2 próbki z każdego materiału. Badania przeprowadzono w układzie miotającym do wyznaczania dynamicznej granicy plastyczności metodą testu Taylora zgodnie z metodyką IMiP WIP Politechniki Warszawskiej. Zastosowano naboje badawcze standardowe pokazane na rysunkach 3 i 4. W badaniach oddano 4 strzały z pomiarem prędkości próbek i ciśnienia gazów prochowych w lufie. Wyniki testu przedstawiono w postaci uproszczonej w tabeli 3. W tabelach przedstawiono wyznaczoną prędkość

The study used specially designed rounds for separate charge. Such a round consisted of a shell closed with a detonating cap with the expelling charge and research bullet inside. The research bullet (Fig. 3) consisted of a sabot (2) made of plastic and the sample (1) made of the researched material placed inside the sabot.



Rys. 4. Próbką po deformacji w teście Taylora

Fig. 4. The sample after deformation in Taylor test

The subject of the research were 4 samples made of austempered ductile cast iron and S215 steel – 2 samples of each material. The research was conducted in the propellant system used for determining the dynamic yield limit with the Taylor test according to the methodology of the Institute of Mechanics and Printing of the Faculty of Production Engineering at the Warsaw University of Technology. The used standard research bullets are presented in Figures 3 and 4. In study 4 shots were fired at the speed of the samples and the pressure of powder gases in the barrel was measured. The results of the

każdej próbki, obliczoną dynamiczną granicę plastyczności oraz umowną granicę plastyczności, którą określono w wyniku badań statycznych. Wyznaczono również tzw. współczynnik wzmocnienia „k”, który jest stosunkiem dynamicznej granicy plastyczności do umownej granicy plastyczności.

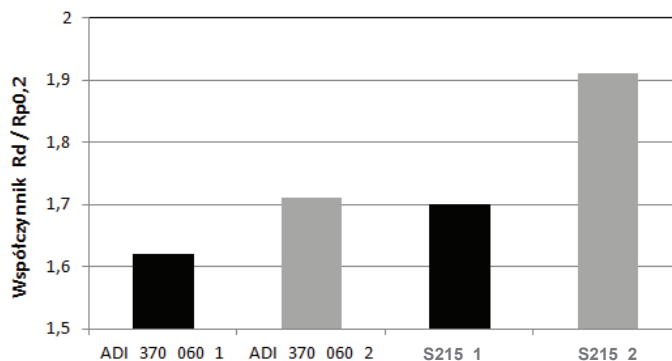
test in a simplified form are presented in Table 3. The tables show the determined speed of each sample, calculated dynamic yield limit and the agreed yield limit, which was set as a result of statistical research. Also the so called „k” coefficient was determined which is the relation of the dynamic yield point to the agreed yield point.

Tabela 3. Wyniki badań dla próbek odkształconych w teście Taylora
Table 3. Results of the research of the samples deformed in Taylor test

Oznaczenie/Mark	Prędkość/Speed	Umowna granica plastyczności / Agreed yield limit	Dynamiczna granica plastyczności / Dynamic yield limit	Współczynnik wzmocnienia / Strengthening coefficient
	V, m/s	$R_{p0,2}$, MPa	R_d , MPa	$k = R_d / R_{p0,2}$
ADI_370_060_1	306	584	947	1,62
ADI_370_060_2	237	584	997	1,71
S215_1	302	380	619	1,70
S215_2	282	380	698	1,91

Z analizy wyników obliczeń wynika, że zarówno żeliwo, jak i stal uległy umocnieniu, na co wskazuje wyraźnie wyższa dynamiczna granica plastyczności w porównaniu z umowną, określoną w próbie statycznego rozciągania. Wskazuje na to również współczynnik „k”, chociaż jego wartości są wyższe dla niższych prędkości uderzenia próbek w „kowadło”, tj. dla próbek ADI_370_060_2 oraz S215_2. W obu tych przypadkach materiał uplastyczył się bardziej niż dla próbek wystrzeliwanych z wyższymi prędkościami (rys. 5).

An analysis of the calculation results shows that both cast iron and steel have been strengthened, as indicated by significantly higher dynamic yield limit compared to the agreed one, as defined in the static tensile test. It is also shown by the „k” coefficient although its values are higher for lower speeds of samples hitting the „anvil” i.e. for sample ADI_370_060_2 and S215_2. In both cases the material plasticized more than in the case of samples fired at higher speeds (Fig. 5).



Rys. 5. Zależność współczynnika wzmocnienia „k” od rodzaju materiału poddanego testowi Taylora
Fig. 5. The relation of the strengthening coefficient „k” to the type of material subject to Taylor test

Badania właściwości materiałowych

Wszystkie odkształcone próbki następnie przecięto wzdłuż osi i na przekroju wykonano szereg badań materiałowych: pomiar twardości, ocenę makro- i mikroskopową oraz pomiary magnetyczne. Pomiary twardości metodą Vickersa przy obciążeniu 100 g zrealizowano w postaci rozkładu od powierzchni

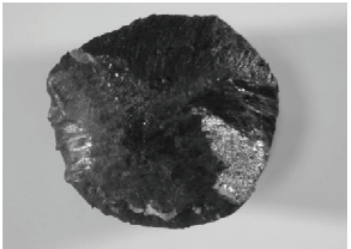

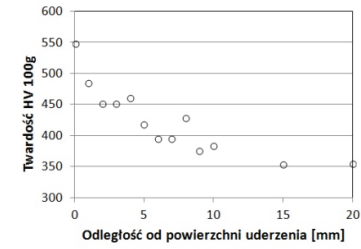
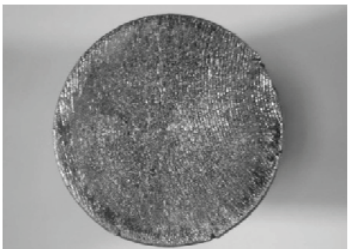

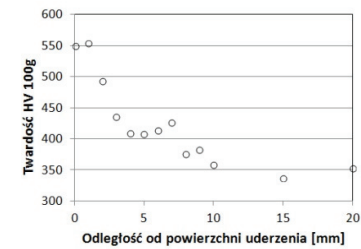


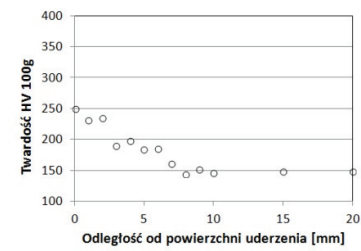
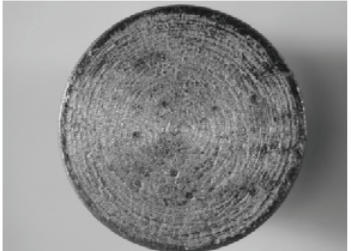

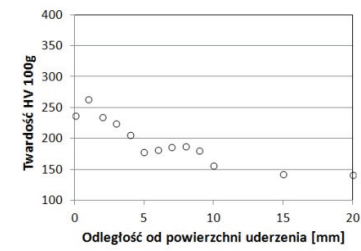
Testing the material properties

All the deformed samples were then cut along the axis and various tests were conducted on the section of the sample: hardness measurement, macro- and microscopic assessment and magnetic measurements. The hardness measurement with Vickers method with a load of 100 g was conducted

czołowej odkształconej próbki w kierunku części nieodkształconej. Ocenę makroskopową wykonano na mikroskopie stereoskopowym badając stopień odkształcenia oraz sposób deformacji powierzchni czołowej próbek. Obserwacje mikroskopowe LM i SEM przeprowadzono na zglądach metalograficznych nietrawionych i trawionych 3% Nitaliem dla powiększeń $\times 200$ i $\times 1000$, identyfikując zmiany w części czołowej każdej z próbek z żeliwa i stali. Pomiar magnetyczny zrealizowano na próbkach żeliwnych za pomocą ferrytomierza, wykorzystując metodę prądów wirowych, oceniając udział faz ferromagnetycznych w czterech charakterystycznych punktach próbki: A, B, C i D (oznaczonych na wykresie), z tym, że punkt A leżał najbliżej krawędzi odkształconej.

as a distribution from the face of the deformed sample to the undeformed part. The macroscopic assessment was performed with a stereoscopic microscope studying the degree of deformation and the way of deformation of the face of the samples. The microscopic observations of LM and SEM were conducted on metallographic sections digested and undigested with 3% Nital for $\times 200$ and $\times 1000$ enlargements identifying changes in the face section of each cast iron and steel sample. The magnetic measurements were performed on the cast iron samples with a ferritometer, using the eddy current method and assessing the share of ferromagnetic phase in the four characteristic points of the sample: A, B, C and D (marked on the graph), where point A was the closest to the deformed part.

Tabela 4. Wyniki badań materiałowych dla próbek odkształconych w teście Taylora
 Table 4. Results of the material tests of the samples deformed in Taylor test

ADI_370_060_1			
ADI_370_060_2			
S215_1			
S215_2			

W tabeli 4 zamieszczono wyniki obserwacji makroskopowych w skojarzeniu z wykresami rozkładów twardości. Widoczne na zdjęciach odkształ-

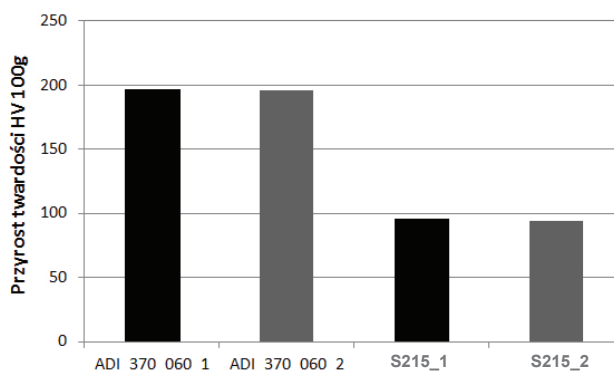
Table 4 presents the results of the macroscopic observations associated with graphs presenting the layout of hardness. The frontally deformed samples

cone czołowo próbki wykazują we wszystkich przypadkach wzrost twardości w strefie zdeformowanej uderzeniem zarówno przy niższych, jak i wyższych prędkościach uderzenia. Uwagę zwraca fakt zniszczenia próbki żeliwnej dla prędkości 306 m/s oraz nieosiowo zdeformowana próbka S215_1. Zarówno pęknięcie, jak i nieosiowość deformacji mogą być spowodowane niecentrycznym uderzeniem próbki o „kowadło”.

Interesującym będzie porównanie próbek: żeliwnej i stalowej odkształconych z niższą prędkością: ADI_370_060_2 i S215_2. Obie próbki mają wyraźną strefę deformacji plastycznej, z tym, że próbka stalowa bardziej „grzybkowaty” charakter, natomiast żeliwna – „beczkowaty”. Obie w strefie odkształconej mają silnie zwiększoną twardość w porównaniu do nieodkształconych części próbki. Próbka żeliwna wykazuje jednak zdecydowanie wyższy stopień utwardzenia (rys. 6) sięgający wartości 550 HV. Taki przyrost twardości może sugerować przemiany fazowe, jakie zaszły w wyniku deformacji na powierzchni czołowej próbki.

visible in the pictures in all cases show an increase of hardness in the area deformed from the hit both at lower and at higher speeds of the hit. Attention is drawn to the fact that the cast iron sample was damaged at speed 306 m/s and that sample S215_1 was deformed eccentrically. Both the crack and the misalignment of the deformation can be the result of an eccentric hit of the sample into the “anvil”.

The comparison of cast iron and steel samples deformed at lower speed will be very interesting: ADI_370_060_2 and S215_2. Both samples have a very distinct area of plastic deformation, however, the steel sample is more mushroom-shaped, and the cast iron one – barrel-shaped. In the deformed area both of them have much higher hardness in comparison to the undeformed areas of the samples. The cast steel sample shows a higher level of hardness (Fig. 6) reaching 550 HV. Such a raise in hardness may suggest phase transitions brought by the deformation to the front part of the sample.



Rys. 6. Przyrost twardości na próbkach – różnica pomiędzy najwyższą twardością zmierzoną na czole próbki a twardością części nieodkształconej

Fig. 6. The increase of hardness of the samples – the difference between the highest hardness measured in the front of the sample with the hardness of the undeformed part

W tabeli 5 zamieszczono zbiorcze wyniki oceny mikroskopowej od czoła każdej z próbek odkształconych uderzeniowo. Stwierdzono znaczną deformację kulek grafitowych w obszarze odkształconym do głębokości min. 1 mm dla próbek żeliwnych. Świadczy to o znacznym zasięgu deformacji, co jednak nie przekłada się na zmodyfikowanie mikrostruktury osnowy – zmiany w osnowie ausferytycznej są nierozpoznawalne dla zastosowanych powiększeń $\times 1000$ i należy je szacować objętościowo, za pomocą innych technik badawczych, np. badania magnetyczne. W próbkach stalowych na niewielkiej głębokości (do kilkuset mikrometrów) widoczne są zdeformowane ziarna ferrytu i perlitu (rys. 7b). Dla stali widoczne jest również mniejsze utwardzenie w strefie odkształconej.

Deformacja próbek z żeliwa i stali poprzez uderzenie w nieodkształcalne „kowadło” powoduje zniekształcenie ziaren w mikrostrukturze tych mate-

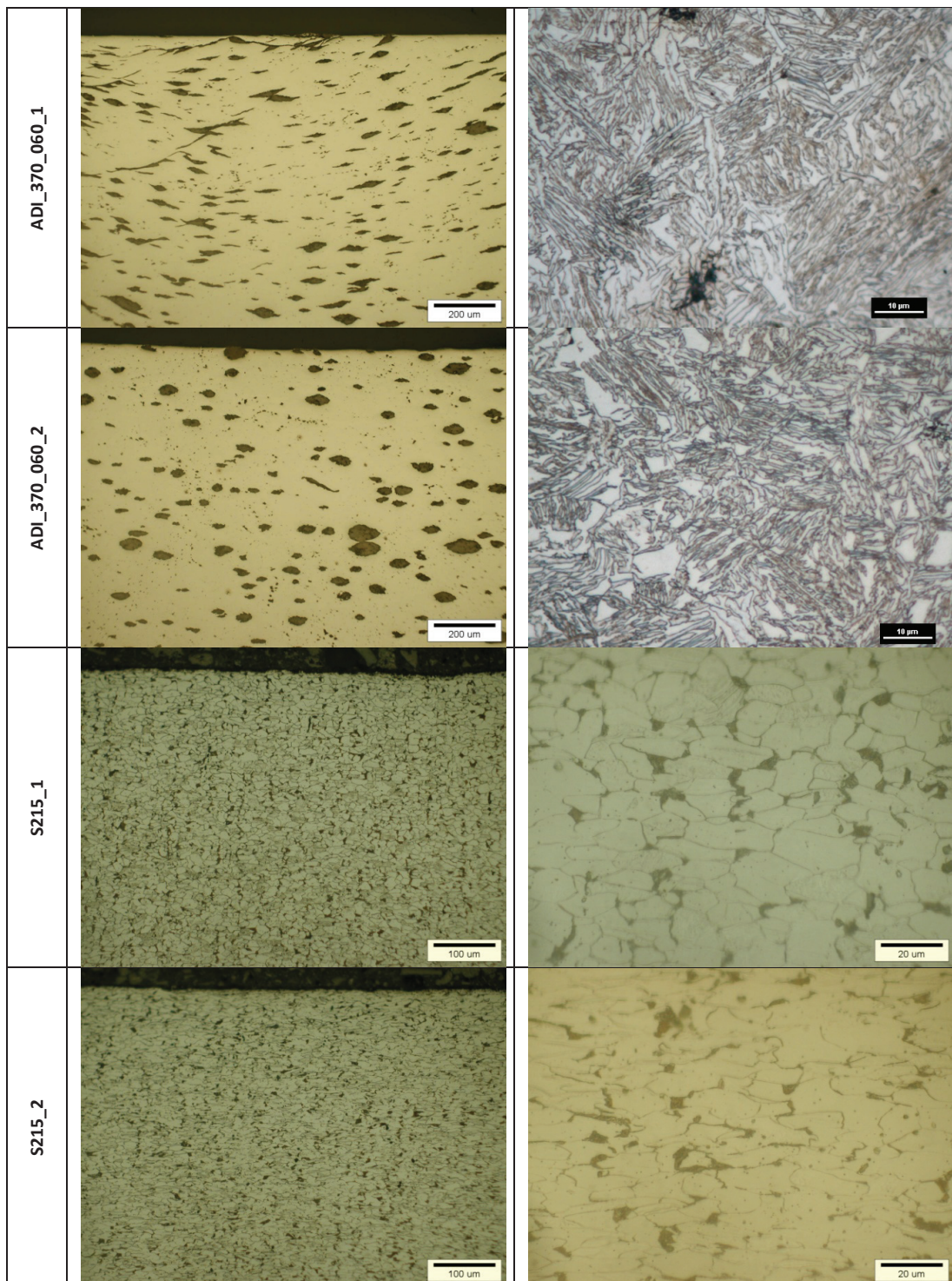
Table 5 presents collective results of microscopic evaluation of the front part of each of the samples deformed by hitting. Significant deformation was found in the graphite balls in the area deformed to the depth of at least 1 mm in cast iron samples. This reflects the large coverage of deformation which does not translate into modified structures of the matrix – the transformations in the austempered matrix are unrecognizable for the used $\times 1000$ enlargements and their volume has to be estimated with other research techniques e.g. magnetic tests. In steel samples at shallow depths (up to several hundred micrometers) there are deformed grains of ferrite and perlite visible (Fig. 7b). In steel there is also less hardening in the deformed area.

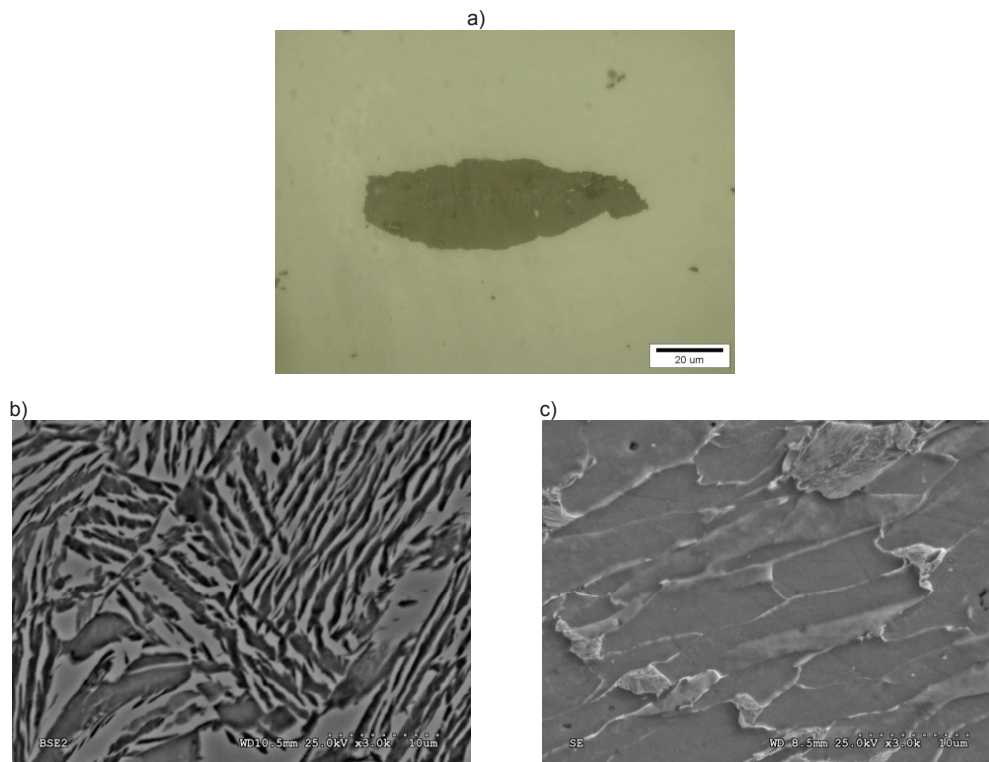
Deformation of the cast iron and steel samples while hitting an undeformable “anvil” causes deformation of the grains in the microstructure of these

riałów. W stali, w strefie deformacji, obserwuje się wydłużone, zgniecione ziarna ferrytu, pomiędzy którymi obecny jest perlit (rys. 7b). W żeliwie ziarna płytkowego ferrytu nabierają wyraźnej kierunkowości (rys. 7a). Niewidoczne jednak są zmiany mikrostruktury, które – oprócz zgniotu – mogłyby wpłynąć na tak znaczący wzrost twardości w strefie odkształconej żeliwa.

materials. In steel the deformation area is elongated, crushed ferrite grains between the perlite can be observed (Fig. 7b). In cast iron the lamellar ferrite grains become clearly directional (Fig. 7a). However, the transformations of the microstructure are not visible while they – apart from crushing – could influence this significant increase of hardness in the deformed area of the cast iron sample.

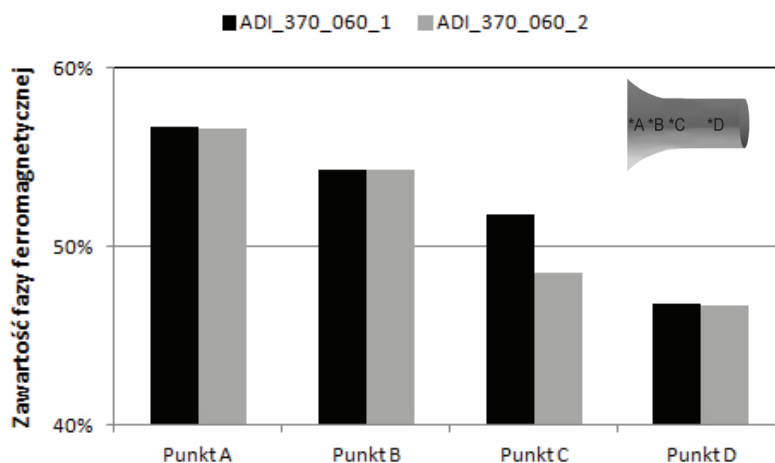
Tabela 5. Wyniki obserwacji mikroskopowych LM dla próbek odkształconych w teście Taylora
Table 5. Results of the LM microscopic observations of the samples deformed in Taylor test





Rys. 7. Mikrostruktura próbek w części bliskiej krawędzi zdeformowanej uderzeniem w „kowadło”:
 a) zniekształcony grafit w żeliwie sferoidalnym, b) ausferytyczna osnowa żeliwa sferoidalnego, c) mieszanina ziaren ferrytu i perlitu w stali

Fig. 7. Microstructure of the samples on the area close to the edge deformed after hitting the "anvil":
 a) deformed graphite in ductile cast iron, b) austempered matrix of ductile cast iron, c) mixture of ferrite and perlite grains in steel



Rys. 8. Zawartość faz ferromagnetycznych na przekroju próbek żeliwnych po teście Taylora
 Fig. 8. The content of ferromagnetic phases on the section of cast iron samples after Taylor test

Bazując na wiedzy o mikrostrukturze żeliwa sferoidalnego ausferytycznego, wiadomo, że pod wpływem odpowiednio dużego odkształcenia pewna część austenitu w osnowie tego materiału przemienia się w twarde martenzyt [4]. Stąd tak wysoka twardość w strefie odkształconej uderzeniem oraz wyraźny przyrost zawartości faz ferromagnetycznych w stosunku do miejsc nieodkształconych próbek

On the basis of the knowledge about the microstructure of austempered ductile cast iron it is known that under the influence of a sufficiently large deformation some proportion of austenite in the matrix of the material is transformed into hard martensite [4]. Hence, such a high hardness in the deformed area and pronounced increase in the content of ferromagnetic phases in relation to the undeformed areas of

(rys. 8) (martenzyt jest fazą ferromagnetyczną w przeciwieństwie do austenitu).

Podsumowanie

W artykule podjęto problematykę dynamicznej deformacji próbek z żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego i stali S215. Cylindryczne próbki, odkształcone czołowo w teście Taylora, wykazują wysoki wskaźnik umocnienia. Obliczenia wskazują, że zarówno w przypadku stali, jak i żeliwa, wyższe wskaźniki umocnienia w analizowanym przypadku powodują niższe prędkości odkształcenia próbek. Zarejestrowany został również wzrost twardości w strefie dynamicznej deformacji próbek. W próbkach stalowych przyrost twardości w stosunku do miejsc nieodkształconych był jednak zdecydowanie mniejszy niż w żeliwie i sięgał 96 HV. W żeliwie o osnowie ausferrytycznej strefa odkształcona ma twardość sięgającą 550 HV, co wskazuje na obecność twardej fazy – martenzytu. W wyniku oceny magnetycznej stwierdzono, że martenzyt pojawia się w osnowie żeliwa w wyniku odkształcenia i jest produktem przemiany paramagnetycznego austenitu.

Test Taylora pozwolił na porównanie żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego ze stalą S215 w warunkach dynamicznego odkształcenia. Oba materiały umacniają się w wyniku uderzenia o nieodkształcalne „kowadło”, jednak mechanizmy tego umocnienia są inne. W stali dominującym jest zgniót, w przypadku żeliwa o osnowie ausferrytycznej dodatkowo pojawia się umocnienie poprzez przemianę austenitu w martenzyt inicjowaną odkształceniem.

Literatura/References

1. Janiszewski J., Gacek J., Burdek M., Stępień J. (2010). Badania dynamicznych właściwości materiałów stosowanych na korpusy. *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, 1(62), 118–123.
2. Grązka M. (2011). Analiza numeryczna deformacji walcowej próbki w zderzeniowym teście Taylora. *Postępy Nauki i Techniki*, 7, 186–194.
3. www.ductlie.org.
4. Guzik E. (2001). *Procesy uszlachetniania żeliwa – wybrane zagadnienia*. Monografia nr 1M Katowice: Archiwum Odlewnictwa PAN.
5. Myszka D., Kaczorowski M., Tybulczuk J. (2003). *Żeliwo sferoidalne ausferrytyczne – bezpośrednio hartowane izotermicznie*. Kraków: Instytut Odlewnictwa.
6. Myszka D., Pokorska I., Mońka G. (2011). Umocnienie warstwy wierzchniej odlewów z żeliwa sferoidalnego ausferrytycznego poddanych kulowaniu. *Inżynieria Materiałowa*, 4(182), 616–619.
7. Jeleńkowski J. (2005). *Kształtowanie struktury stali Fe-26Ni-2Ti z wykorzystaniem przemiany martenzytycznej*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW.
8. Myszka D. (2007). Austenite-martensite transformation in austempered ductile iron. *Archives of Metallurgy and Materials*, 3(52), 475–480.
9. Garin J.L., Mannheim R.L. (2003). Strain-induced martensite in ADI alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, 347–351.
10. Nili Ahmadabadi M. (1997). Bainitic transformation in austempered ductile iron with reference to untransformed austenite volume phenomenon. *Metall. Mater. Trans. A* 28(10), 2159–2162.

the sample (Fig. 8) (the martensite phase is ferromagnetic as opposed to austenite).

Conclusions

The article touches upon the issue of dynamic deformation of austempered ductile cast iron and S215 steel. Cylindrical samples, deformed frontally in the Taylor test, show a high strengthening coefficient. The calculations show that both in the case of steel and cast iron the higher strengthening coefficients in the analyzed case cause lower speeds of sample deformation. An increase of hardness in the area of dynamic deformation of the samples was also recorded. In the steel samples the increase of hardness compared to the undeformed areas was significantly lower than in cast iron and reached 96 HV. In cast iron with austempered matrix the deformed area's hardness reaches 550 HV, which indicates the presence of the hard phase – martensite. The magnetic evaluation shows that martensite in the matrix occurs due to deformation of the iron and is a product of paramagnetic austenite transformation.

The Taylor test allowed comparing austempered ductile cast iron with S215 steel in dynamic deformation. Both materials hardened after hitting the undeformable "anvil" but the mechanisms of this process are different. In steel the deformation is dominant, and in the case of cast iron with austempered matrix there occurs additional hardening due to transformation of austenite in martensite initiated by the deformation.