

DEFORMACJA PLASTYCZNA ŻELIWI BOGATYCH W MIEDŹ W WARUNKACH IZOTERMICZNYCH

W artykule przedstawiony został charakter deformacji żeliw bogatych w miedź ($Cu > 6\%$) w wysokich temperaturach. Stwierdzone zostało, że dla identycznych warunków deformacji można uniknąć charakterystycznej warstwowej struktury żeliw z kompaktowym grafitem przy formowaniu w strukturze włączy na podstawie miedzi, które obejmują kryształy grafitowe.

Taki rodzaj otrzymanych stopów metali pozwala na użycie technologii przetwarzania za pomocą ciśnienia dla produkcji wyrobów przeznaczenia tribologicznego.

Słowa kluczowe: deformacja plastyczna, żeliwo, miedź, faza wysokomiedziowa, struktura, plastyczność, trwałość.

PLASTIC DEFORMATION HIGHCOPPER CAST IRONS IN ISOTHERMAL CONDITIONS

In this article we established the character of deformation highcopper cast irons ($Cu > 6\%$) during elevated temperatures. We found that for the same deformation conditions can be avoided characteristic layered structure of compact graphite cast irons in the formation of inclusions in the structure based on copper covering graphite crystallites. This condition allows to apply the obtained alloy fabrication technology for production Tribological appointment.

Keywords: plastic deformation, cast iron, copper, highcopper phase, structure, flexibility, durability.



D. Gusaczuk

doktor nauk technicznych,
docent katedry materiałoznawstwa
oraz plastycznego formowania
konstrukcji inżynierii maszynowej
Narodowego Uniwersytetu technicznego
w Łucku



I. Parfeniewa

doktor nauk technicznych,
docent katedry rozwoju miejskiego i
gospodarki
Narodowego Uniwersytetu technicznego
w Łucku



O. Salinskiy

student grupy OTm-61 katedry
oraz plastycznego formowania
konstrukcji inżynierii maszynowej
Narodowego Uniwersytetu technicznego
w Łucku

ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ВИСОКОМІДИСТИХ ЧАВУНІВ В ІЗОТЕРМІЧНИХ УМОВАХ

В роботі встановлено характер деформування високомідистих чавунів ($Cu > 6\%$) при підвищених температурах. Встановлено, що для однакових умов деформування можна уникнути характерної шаруватої структури чавунів з компактним графітом при формуванні в структурі включень на основі міді, які охоплюють графітні кристали. Такий стан отриманих сплавів дозволяє застосувати технології обробки тиском для виготовлення виробів триботехнічного призначення.

Ключові слова: пластична деформація, чавун, мідь, високомідиста фаза, структура, пластичність, зносостійкість.

Постановка проблеми. Присутність міді в сірих чавунах дозволяє покращити їх деякі фізико-механічні характеристики як конструкційних матеріалів. При високих добавках міді в структурі сірих чавунів формується специфічна структура з наявністю кулястих включень у вигляді суміші двох фаз графіту та високомідистої γ -фази (Γ^+). Така структура підвищує здатність сірих чавунів з компактним графітом до холодної пластичної деформації в умовах всебічного нерівномірного стиснення. Проте, поведінка подібних сплавів в умовах деформування при підвищених температурах не вивчена.

Сірі чавуни з компактним графітом знайшли широке використання в техніці. Ці сплави технологічні та мають задовільні властивості, особливо за умов використання їх в трибовузлах з обмеженим змащенням. Актуальним залишається питання розширення функціональних властивостей цих сплавів, що сформувало окремий напрямок в сучасному матеріалознавстві чавунів – синтез литих композитних матеріалів (ЛКМ). Легування чавунів міддю [1, 2] понад 6% суттєво змінює макро- та мікроструктуру виливків, формуючи додаткові трибофазы та структурні складові на основі міді. Наявність полідисперсних структур суттєво змінює механічний стан високомідистих чавунів [3], що потребує додаткового вивчення.

Метою досліджень було встановити характер деформування високомідистих чавунів з компактним графітом в ізотермічних умовах.

Методика досліджень. Для дослідження пластичної деформації високомідистих чавунів ($Cu = 6...9\%$; $C, Si = 5,5\%$, модифікування Mg) використовувався метод деформування, що полягав в осаджуванні циліндричного зразка, запресованого в пластичну об'єм (сталь 20) у високотемпературній камері при сталій температурі ($\pm 10^\circ C$). Для такого виду випробувань використовувався спеціально виготовлений дослідний штамп (рис. 1). Осаджування проводилось між двома жароміцними плитами (сплав ЖС6У). Контроль температури зразка при проведенні досліджень здійснювали за допомогою двох термопар типу ТХА, розміщених по обидві діаметрально протилежні сторони зразка. Дослідження проводили в інтервалі температур від $500^\circ C$ до $800^\circ C$. Структура металічної матриці чавунів всіх плавок перед деформуванням була перлітною.

Виклад основних положень. У роботі використовувалися леговані міддю чавуни, в яких високомідиста фаза на основі міді (γ -фаза) виділяється у вигляді дрібних включень різної морфології, а також здатна формувати механічну суміш (Γ^+). Причому остання структурна складова має значні розміри і кулясту форму (рис. 2), в зв'язку з чим досліджувані чавуни можна віднести до типових литих композитів ендегенного походження

[4]. Макроструктурні дослідження показали рівномірність розподілення включень Γ^+ та їх компактну форму.

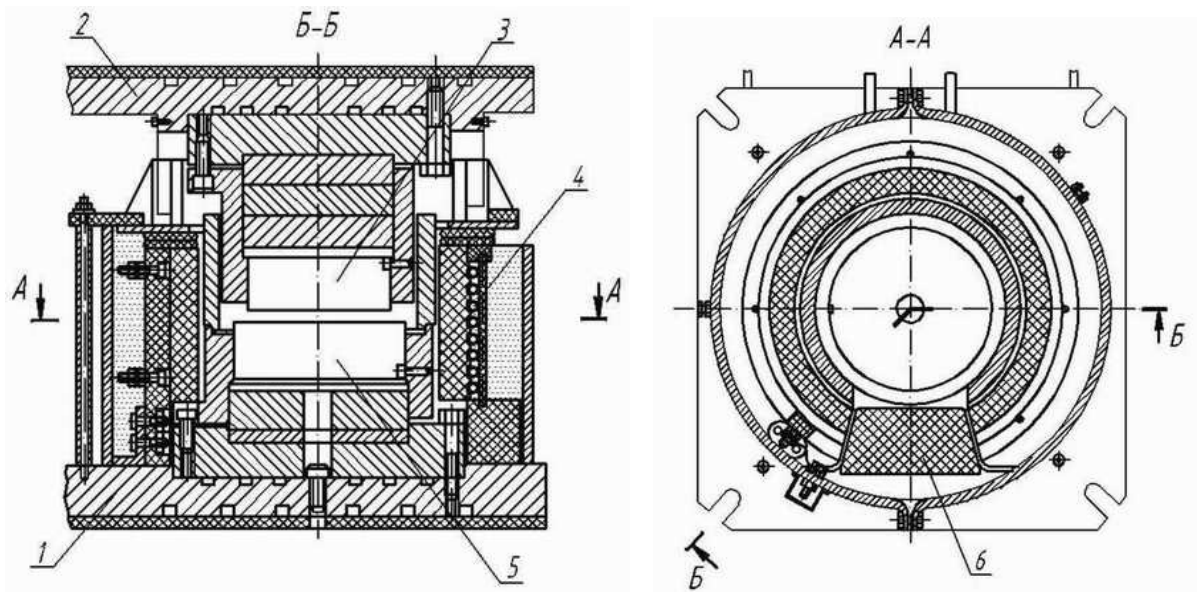


Рисунок 1 – Штмп для ізотермічного деформування:

1, 2 – нижня та верхня плити; 3, 5 – робочі вставки; 4 – нагрівач; 6 – заглушка.

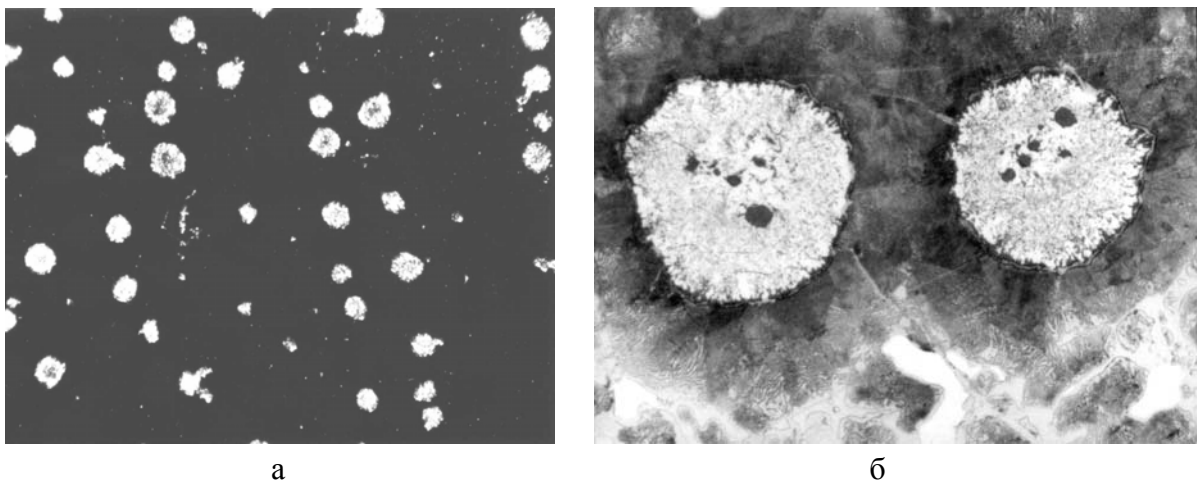


Рисунок 2 – Макро- (а) та мікроструктура (б, $\times 400$) виливків Си-чавуну.

Поведінку отриманих ЛКМ при пластичному деформуванні вивчали на основі залежностей "напруження–деформації" (" σ – ϵ "). При цьому за характеристику напруженого стану в зразку було взяте узагальнене напруження. За методикою [5] таке напруження назване приведеним напруженням σ_i , визначається за умов суміщеної осадки крихкого зразка в пластичній об'ємі (рис. 3). Це напруження кількісно характеризує напружений стан зразка і загалом є октаедричним тангенціальним напруженням, а тому

визначає здатність матеріалу чинити опір зсуву. Від октаедричного напруження воно відрізняється числовим множником

$$\sigma_i' = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_i'$$

При суміщеному осаджуванні чавунного зразка з пластичною обіймою, матеріал останньої створює бічний тиск $p = \sigma_1 + \sigma_2$. Це дозволяє формувати в матеріалі зразка схему напружено-деформованого стану, яка відповідає всебічному нерівномірному стисненню. Як відомо така схема напружено-деформованого стану властива технологічним процесам пресування, видавлювання.

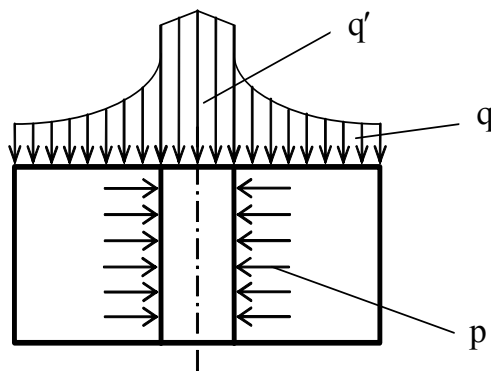


Рисунок 3 – Схема розподілу тиску на торцях зразка та обійми

Для циліндричної системи координат повне зусилля стискання обійми з зразком можна представити у вигляді суми інтегралів:

$$P = \int_0^{a_1} q' 2\pi r dr + \int_{a_1}^{b_1} q 2\pi r dr ,$$

де: q та q' – інтенсивність розподілу тисків на торцевій поверхні обійми та зразка; a_1 та b_1 – радіуси зразка та обійми.

Приймаючи, що деформації та напруження в обіймі та зразку розподілені рівномірно, можна записати вирази для q та q' :

$$q = \sigma_i e^{\left(\frac{2f(b_1-r)}{h}\right)} ,$$

$$q' = (p + \sigma_i') e^{\left(\frac{2f(a_1-r)}{h}\right)} ,$$

де: σ_i – напруження матеріалу обійми; σ_i' – приведені напруження; f – коефіцієнт тертя; h – висота конструкції „обойма-зразок”.

Радіуси обійми та зразка в момент осаджування визначаються з умови постійності об'єму:

$$b_1 = \frac{b}{\sqrt{1-\varepsilon}}, \quad a_1 = \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon}},$$

де: b та a – початкові радіуси обійми та зразка; ε – ступінь осадки.

Підставляючи вирази для q та q' в рівняння для повного зусилля та проводячи інтегрування можна отримати вираз для приведенного напруження:

$$\sigma'_i = \sigma_i \left(1 + e^{f(\alpha-\beta)} + \frac{K+1+f\alpha(1-f\beta)e^{f(\alpha-\beta)}}{e^{f\beta} - (1-f\beta)} \right),$$

де: α та β – числа, які ідентифікують ступінь спотворення обійми та зразка; K – коефіцієнт.

Числа α та β визначаються за формулами:

$$\alpha = \frac{2b}{h_0(1-\varepsilon)^{1,5}}, \quad \beta = \frac{2a}{h_0(1-\varepsilon)^{1,5}}.$$

Коефіцієнт K визначається:

$$K = \frac{2Pf^2}{\sigma_i \pi h^2}.$$

Для використаної в дослідженнях методики співвідношення головних напружень буде постійно змінюватись. Тому при вивченні деформації досліджуваних чавунів, для характеристики напруженого стану, що відповідає певному рівню механічних параметрів, є доцільним визначення залежності зміни коефіцієнта співвідношення головних напружень ($m = \sigma_3/\sigma_2$) від ступеня відносної деформації. При побудові залежностей $m=f(\varepsilon)$, враховувались значення торцевого тиску q' в центрі чавунного зразка та на його бічній поверхні (при $r=a_1$):

$$m = \frac{\left(p + \sigma'_i \right) e^{\left(\frac{2fa_1}{h} \right)}}{p}.$$

За результатами досліджень (рис. 4) встановлено, що для високомідистого чавуну характер зміни напруження деформування при підвищенні температури від 500 до 700 °С є суттєвим. Спостерігається суттєве зменшення опору деформуванню через кожні 50 °С. При цьому приріст пластичності спостерігається лише після 600 °С.

Порівняно невисока пластичність високомідистого чавуну може бути наслідком значного спотворення та руйнування структурновільного графіту відпалу, який присутній у

відпалених зразках перлітного чавуну. Включення графіту відпалу є не захищеними від інтенсивних пластичних зсувів в металевій матриці чавуну та руйнуючись створюють концентратори напружень, особливо у зовнішній кільцевій зоні розтягуючих напружень деформованого осадкою зразка. Включення графіту охоплені мідистою оболонкою мало спотворюються.

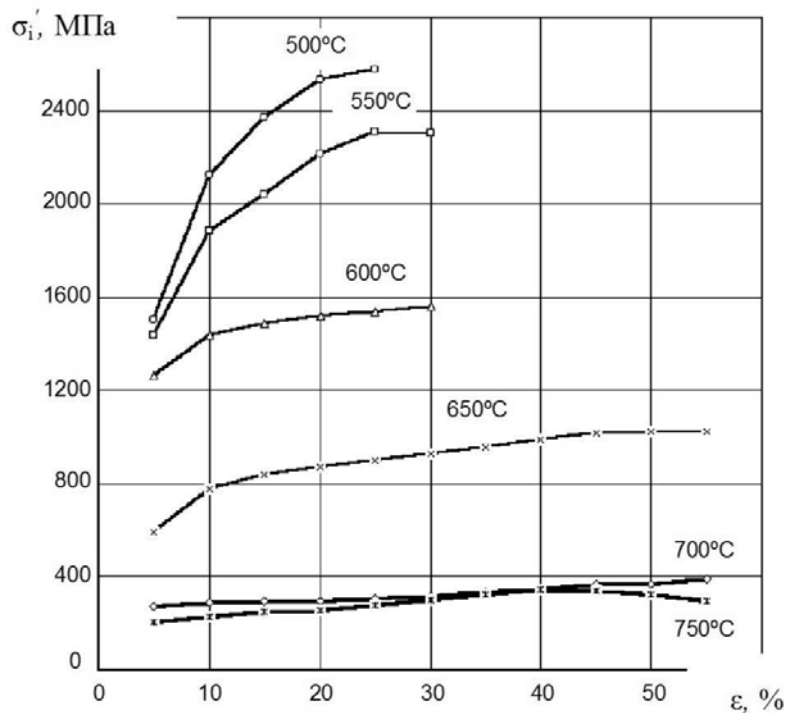


Рисунок 4 – Залежності " σ_1 " при ізостатичному деформуванні високомідистого чавуну (Cu=8,5 %).

Навпаки в межах субкритичних температури 700 та 750 °C опір деформуванню мало відрізняється. Підвищення температури деформації на 50 °C практично не викликає пониження параметра при збереженні ресурсу пластичності сплаву. Цей інтервал температур можна вважати субкритичним інтервалом для розроблених сплавів, який супроводжується \rightarrow перетворенням. Надалі, коли фазове перетворення триває, підвищення температури мало впливає на зміну σ_1 . Крім того, при температурі 700 °C сплави характеризуються найвищою пластичністю. Це викликано значним розвитком дифузійних процесів при фазовому переході, що охоплюють весь об'єм перлітної матриці, а отже пластичне течіння проходить більш гомогенно не викликаючи значного спотворення та руйнування трифаз: Γ , Γ_+ . Таким чином, температуру нагріву 700 °C слід вважати найбільш оптимальною для реалізації ефекту субкритичної надпластичності високомідистих чавунів.

Висновок. Для використаних в роботі чавунів досягнуто ефекту субкритичної надпластичності, коли при деформуванні сплавів спостерігається підвищення здатності до пластичної деформації Fe-C матриці за рахунок одночасного проходження фазового претворення \rightarrow . Отримані результати планується використати при розробці технологій пластичного формування трибовиробів за схемою видавлювання чи пресування.

Передбачається, що отримані з розроблених ЛКМ вироби будуть мати меншу собівартість в порівнянні зі сплавами типу бронз при збереженні достатньої надійності під час експлуатації.

Література:

1. Бобро Ю.Г. Формирование литой структуры высокомедистых ЛКМ в процессе эвтектического превращения // Бобро Ю.Г., Парфентьева И.А. // Процессы литья. № 2. – 2003. – С.49-52.
2. Бобро Ю.Г. Износостойкие литые композиты, синтезированные на основе серых чугунов // Гусачук Д.А., Парфентьева И.А., Дмитриюк Н.В. // Процессы литья. – № 4. – 2004. – С.75-80.
3. Бобро Ю.Г. Деформационная способность высокомедистых ферритных чугунов с шаровидным графитом // Бобро Ю.Г., Гусачук Д.А., Дмитриюк Н.В. // Кузнечно-штамповочное пр-во. 1999. № 7. С.6-8.
4. Найдек В.Л. Композиционные материалы – тенденции, проблемы и перспективы развития // Найдек В.Л., Затуловский С.С. // Процессы литья. – 2004. – №4. – С.3-10.
5. Горб М.Л. Определение радиального давления на образец в условиях объемного неравномерного сжатия // Горб М.Л., Пелепелин В.М., Черняк Н.И. // Прикл. механика. 1965. 1, вып.10. С.87-92.

PLASTIC DEFORMATION HIGHCOPPER CAST IRONS IN ISOTHERMAL CONDITIONS

S. Szymczuk, N. Zajczuk, O. Mykytiuk

Statement of the problem . The presence of copper in gray cast irons providing to improve some of their physical and mechanical properties as structural materials. At high copper supplements in the structure of gray cast iron is formed specific structure with the presence of spherical particles in a two phase mixture of graphite and highcopper -phase (L +). This structure enhances the ability of gray cast iron with a compact graphite to cold plastic deformation in a comprehensive uneven compression. However , the behavior of these alloys under deformation at elevated temperatures has not been studied .

Grey cast irons with a compact graphite are widely used in engineering. These alloys are satisfactory and technological properties, especially in their use in tribenodes with limited lubrication. The issue of expansion of functional properties of these alloys is actual, which formed a separate line in modern materials science irons - a synthesis of molten composite materials (MCM). Alloying cast irons with copper [1 , 2] over 6 % significantly alters the macro-and microstructure of castings , creating additional tribephases and structural components based on copper . The presence of polydisperse structures significantly alter the mechanical state of highcopper cast irons [3], which requires further study.

The aim of research was to establish the nature of deformation highcopper cast irons with compact graphite in isothermal conditions.

Methodology of researches . For investigation the plastic deformation highcopper cast irons (Cu = 6 ... 9 %; C,Si = 5,5%, modification Mg) is used the method of deformation , which consisted in deposition of cylindrical specimen pressed into the plastic hug (steel 20) in the high-temperature chamber at constant temperature($\pm 10^{\circ}\text{C}$).

For this type of test is used a specially made stamp research (Fig. 1). Deposition was carried out between two heat-resistant plates (alloy ZHS6U). The control of temperature of the sample during the research was carried out using two thermocouples type THA placed on either diametrically opposite sides of the sample. The study was carried out in the temperature range from 500 °C до 800 °C. The structure of the metallic matrix of all cast irons heats before deformation was pearlitic.

Summary of the main provisions. We use copper alloy cast irons in this article, in which highcopper phase based on copper (γ -phase) is released in the form of small particles of varying morphology, and capable to form a mechanical mixture (Γ^+). The latter structure has significant structural component sizes and spherical shape (Fig. 2), and therefore investigated cast irons can be attributed to the typical cast composites of endogenous origin [4]. Macrostructural studies showed uniform distribution of inclusions Γ^+ and compact form.

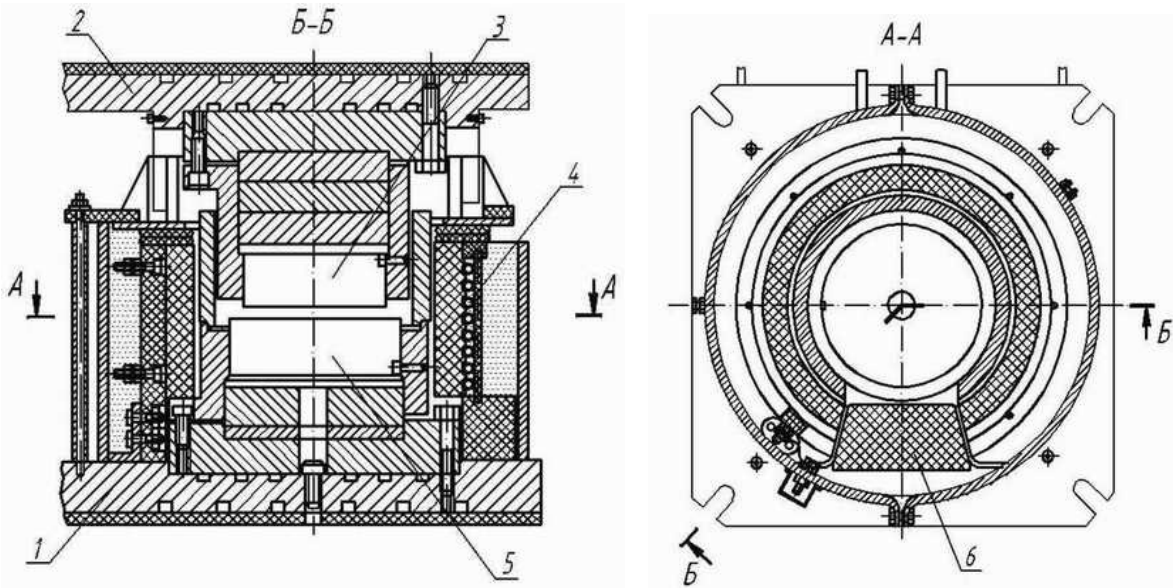


Figure 1 - stamps for isothermal deformation :

1, 2 - lower and upper plates 3, 5 - working inserts , 4 - heater , 6 - cap .

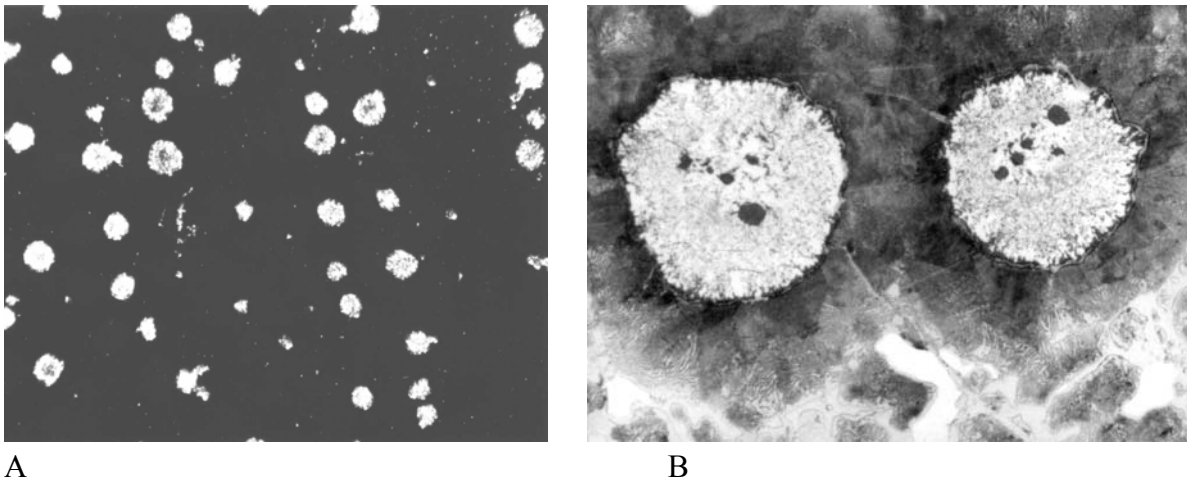


Figure 2 - Macro -(a) and microstructure (b , $\times 400$) Cu- iron castings .

The behavior of the obtained coatings for plastic deformation was studied on the basis of dependency " stress - deformations " ("□□□□□"). In this case the description of the stress state in

the specimen was taken generalized stress. By the method of [5] is called the reduced voltage stress σ_i is determined by conditions combined draft brittle sample in plastic hugs (Fig. 3). This tension quantifies the stress state of the sample and are generally octahedral tangential stress , and therefore determines the ability of a material to resist of shear . From octahedral stress it is different numerical factor

$$\sigma_i' = \frac{3}{\sqrt{2}} \tau_i'$$

With the combined iron deposition model with plastic embrace, the latter material creates lateral pressure $p = \sigma_1 + \sigma_2$. This allows the material to form a circuit pattern of the stress- strain state , which corresponds to the full non-uniform compression. As we know , such a scheme mode of deformation is characteristic of the technological processes of pressing, extrusion .

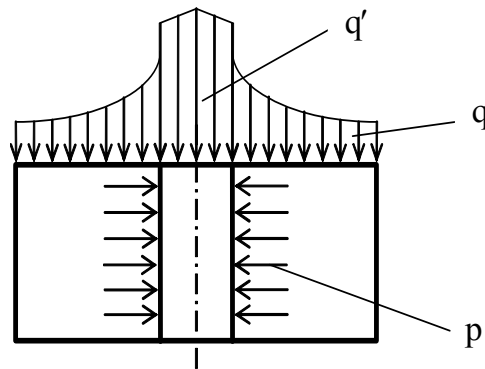


Figure 3 - Schematic pressure distribution at the ends of the sample and extrusion

For a cylindrical coordinate system full force of the compression cage model can be represented as a sum of integrals :

$$P = \int_0^{a_1} q' 2\pi r dr + \int_{a_1}^{b_1} q 2\pi r dr$$

where : q and q' - the intensity of the pressure distribution on the front surface of the sample and extrusion , a1 and b1 - radius of the sample and extrusion. Assuming that the deformation and stress in the specimen holder and uniformly distributed , we can write expressions for q and q' :

$$q = \sigma_i e^{\left(\frac{2f(b_1-r)}{h}\right)}$$

$$q' = (p + \sigma_i') e^{\left(\frac{2f(a_1-r)}{h}\right)}$$

where : σ_i - tension of material extrusion ; σ_i' - harmonized stress ; f - friction ; h – height of design " extrusion - sample" .

The radius of extrusion and the sample at the time of deposition determined from the condition of constancy of volume :

$$b_1 = \frac{b}{\sqrt{1-\varepsilon}} , \quad a_1 = \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon}}$$

where : b and a - initial radius of extrusion and the sample ; ε - degree of submersion
Substituting the expressions for q and q' in the equation for the complete integration of efforts and spending can get the expression for the reduced tension:

$$\sigma'_i = \sigma_i \left(1 + e^{f(\alpha-\beta)} + \frac{K+1+f\alpha(1-f\beta)e^{f(\alpha-\beta)}}{e^{f\beta} - (1-f\beta)} \right)$$

where : α and β - numbers that identify the degree of distortion and sample of extrusion , K - coefficient.

The numbers α and β are determined by the formulas:

$$\alpha = \frac{2b}{h_0(1-\varepsilon)^{1,5}}, \quad \beta = \frac{2a}{h_0(1-\varepsilon)^{1,5}}.$$

Coefficient K is defined by:
$$K = \frac{2Pf^2}{\sigma_i \pi h^2}$$

For the using of methods in studies ratio of major stress will continually change. Therefore, the exploration of the deformation of the studied cast irons , to describe the stress state corresponding to a certain level of mechanical parameters appropriate definition changes depending on the ratio of principal stress coefficient ($m = \sigma_3/\sigma_2$) on the degree of strain . With the construction of dependencies $m = (f())$, considering the meaning of the mechanical pressure q' in the center of the iron sample and side surface ($r=a_1$):

$$m = \frac{(p + \sigma'_i) e^{\left(\frac{2fa_1}{h}\right)}}{p}$$

According to the research (Fig. 4) revealed that for highcopper cast iron the change in strain deformation temperature increases from 500 to 700 °C is essential. There is a significant decrease in deformation resistance every 50 °C. This increase in ductility is observed only after 600 °C.

Relatively low ductility highcopper of cast iron may be due to significant distortion and destruction structurally free graphite annealing, which is present in samples annealed pearlitic of cast iron. The inclusion of graphite annealing is not protected from the intense plastic displacements in a metal matrix cast iron hubs and destroying create tensions , especially in the outer ring zone of tensile stress strain extrusion of standard. The inclusion of graphite covered cupreous cover was little distorted.

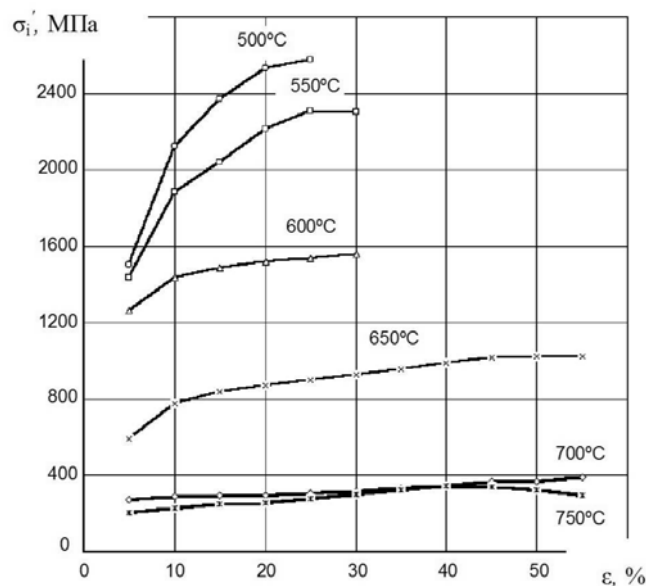


Figure 4 - dependences "□; □□□□" in isostatic deformation of highcopper of cast iron (Cu = 8.5 %).

On the contrary within subcritical temperatures 700 and 750 °C resistance deformation little changes. Increasing the temperature of deformation to 50 °C is virtually doesn't reduce of parameter while maintaining ductility resource of alloy.

This temperature range can be considered subcritical interval for the developed alloys , accompanied by $\gamma \rightarrow \delta$ transformation. Later, when the phase transformation continues, the temperature increase has little effect on changing δ .

In addition, during the temperature of 700 °C alloys have the highest ductility. This is a significant development of diffusion processes at the phase transition, covering the entire volume of pearlitic matrix and hence plastic movement is more homogeneously without causing significant distortion and destruction triphases : Γ , δ , Γ^+ . Thus, the heating temperature 700°C should be considered to implement the optimal superplasticity effect subcritical highcopper of cast irons.

Conclusion. For using in article the cast irons achieved effect of subcritical superplasticity when the alloy during deformation observed increased ability to plastic deformation of Fe-C matrix due to the simultaneous passage of phase transformation $\gamma \rightarrow \delta$. The results will be used in the development of plastic forming technology triproducts for scheme squeezing or pressing. It is assumed that the obtained coatings developed products will have a lower cost in comparison with alloys such as bronze , while maintaining sufficient reliability during operation.