

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 621.762 : 621.039

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОСАДКЕ ОБРАЗЦОВ**

© 2022 В.В. Синельщиков, С.А. Томилин

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В статье отмечена целесообразность применения порошковых материалов для изготовления ряда изделий, применяемых в атомной энергетике. Учитывая высокие требования к изделиям, эксплуатируемым в атомной отрасли, вопросы изучения свойств материалов, полученных методами порошковой металлургии, и его поведения в различных условиях являются актуальными. Приведены результаты исследований по влиянию температуры на пластические свойства порошкового материала при горячей осадке пористых образцов цилиндрической формы. Установлено, что при температуре перекристаллизации (перехода феррита в аустенит) пластические свойства пористого материала уменьшаются.

*Ключевые слова:* динамическое горячее прессование, температура нагрева, порошковая заготовка, пора, трещина, температура перекристаллизации, феррит, аустенит, пластичность.

Поступила в редакцию 14.02.2022

После доработки 18.02.2022

Принята к печати 24.02.2022

В зависимости от нагрузок, условий эксплуатации, требований безопасности изделия из порошковых материалов с определёнными свойствами применяются в различных областях атомной энергетике.

Плотные изделия из порошковых материалов с конструкционными свойствами используются в качестве рабочих деталей атомных реакторов некоторых типов АЭС, пористые – для эффективной фильтрации отработанной воды в охлаждающих контурах. Кроме этого, порошковые материалы находят применение для изготовления поглотителей с замедлителями, а также стержней для регулировки и тепловыделяющих элементов.

В работе [1] проведено исследование по применимости порошковой стали для изготовления деталей уплотнения специальной энергетической арматуры, которая является одним из основных элементов, определяющих надёжность эксплуатации тепловых и атомных электростанций. Авторами установлено, что материалы порошковых композиций на основе стали Гадфильда со стеклянной составляющей перспективны для использования в арматуростроении для изготовления деталей тяжёлонагруженных уплотнений небольшого размера. Кроме того, в работе представлена технология изготовления сёдел клапанов запорной арматуры методом динамического горячего прессования (ДГП).

Учитывая высокие требования к изделиям, эксплуатируемым в атомной энергетике, остаются актуальными вопросы исследования свойств материалов, полученных методами порошковой металлургии, а также их поведение в различных условиях. Некоторые результаты таких исследований представлены в работах [2-7].

В статье приведены результаты исследований по влиянию температуры на пластические свойства порошкового материала при горячей осадке пористых образцов цилиндрической формы.

Пластическая деформация нагретых порошковых заготовок простой (цилиндрической) формы, применяемых для изготовления методом ДГП или горячей штамповки (ГШ) сложных по конфигурации деталей машиностроения, должна осуществляться без нарушения целостности пористого материала.

Пластичность нагретого пористого материала из железного порошка зависит от многих технологических факторов процесса ДГП: гранулометрического состава, исходной пористости заготовок [7], состава шихты, температур спекания и нагрева перед прессованием.

Пластичность металлической основы образца определяется, главным образом, структурой и химическим составом к моменту её деформирования.

На пластичность связей между бывшими частицами порошка влияют те же факторы и, кроме этого, она зависит от условий формирования этих связей. Скопление легкоплавких соединений (FeS, FeO, NiO, SiO и другие) на границах зёрен этих связей приводит к резкому уменьшению пластичности металла при высоких температурах [8].

Целью настоящего исследования является установление зависимости пластических свойств нагретого пористого материала из металлического железного порошка от температуры нагрева при свободной осадке цилиндрических образцов.

Исследования проводили на спеченных цилиндрических образцах из железного порошка ПЖ4С2 с исходной пористостью  $25 \pm 1\%$ , спеченных при температуре  $t_{cn} = 1100^{\circ}\text{C}$  в течение 20 минут. Химический состав порошкового железа после спекания показал, что содержание углерода колеблется от 0,04 до 0,06 %. Исходная пористость принималась с учётом результатов исследований, представленных в [7].

Осадку образцов проводили с использованием копра, что позволило регулировать удельную работу деформирования  $W$ ,  $\text{кГс}\cdot\text{м}/\text{см}^3$  за счёт высоты подъёма ударника. Это способствовало определению точного состояния бочкообразной поверхности осаживаемого образца. На рисунке 1, а приведена фотография цилиндрической поверхности образца до деформации и бочкообразной поверхности (рис. 1, б) в момент появления трещин.

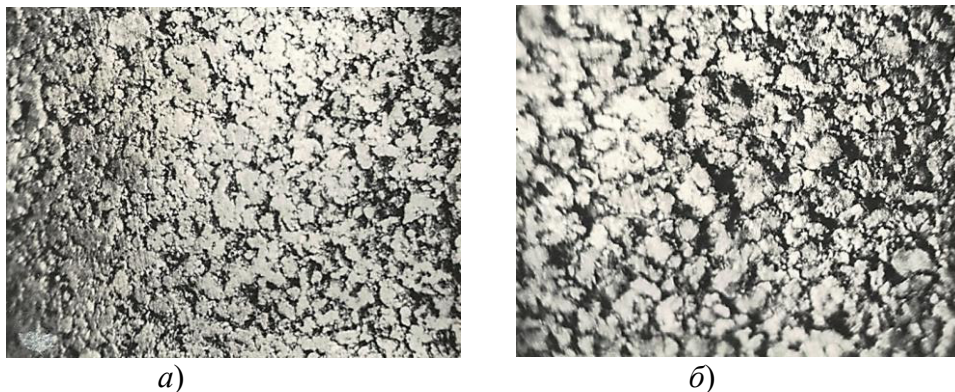


Рисунок 1 – Состояние периферийной поверхности порошкового образца до (а) и после (б) осадки (x30)  
[Peripheral surface condition of the powder sample before (a) and after (b) precipitation (x30)]

Фиксирование момента исчерпания пластичности (появление разрывов протяжённостью примерно 3–4 частиц порошка вдоль оси образца) устанавливали визуальным осмотром этой поверхности, а также при увеличении  $\times 30$ .

Степень деформации образцов определяли через коэффициенты высотной  $k_h = h_0 / h$  и поперечной  $k_R = d / d_0$  деформаций (где  $h_0$ ,  $d_0$  – начальная высота и диаметр порошковой заготовки;  $h$ ,  $d$  – текущие значения этих параметров) [9].

Эти коэффициенты принимали в качестве оценочных параметров пластических свойств нагретого порошкового материала при динамической осадке образцов в момент появления первых трещин:  $(k_h)_{mp} = h_0 / h_{mp}$ ;

$$(k_R)_{mp} = d_{mp} / d_0.$$

Установлена зависимость высотной  $k_h$  (1, 2) и поперечной  $k_R$  (3, 4) деформаций от температуры  $t_n^{\circ}\text{C}$  нагрева пористых образцов перед осадкой (рис. 2, а) при различных удельных работах деформации:  $W = 5$  (графики 1, 3) и  $W = 6$  (графики 2, 4),  $\text{кГс}\cdot\text{м}/\text{см}^3$ .

В экспериментах потеря температуры нагрева образцов при их переносе из нагревательной печи в приспособление для осадки составила 40 – 50 $^{\circ}\text{C}$ . На рисунках 2, а, б нанесены вторые оси абсцисс, на которых отмечены шкалы температур  $t_{oc}^{\circ}\text{C}$ , соответствующих условиям осадки образцов.

Анализ графиков 1, 2, 3, 4 (рис. 2, а) показал, что в интервале температур осадки  $t_{oc} = 800 - 900^{\circ}\text{C}$  происходит снижение показателей  $k_h$  и  $k_R$  пластической деформации образцов, что связано с фазовой перекристаллизацией феррита в аустенит. Увеличение доли аустенита [10] является основной причиной снижения показателей, количественно оценивающих деформацию образцов, в связи с тем, что аустенит менее пластичен, чем феррит.

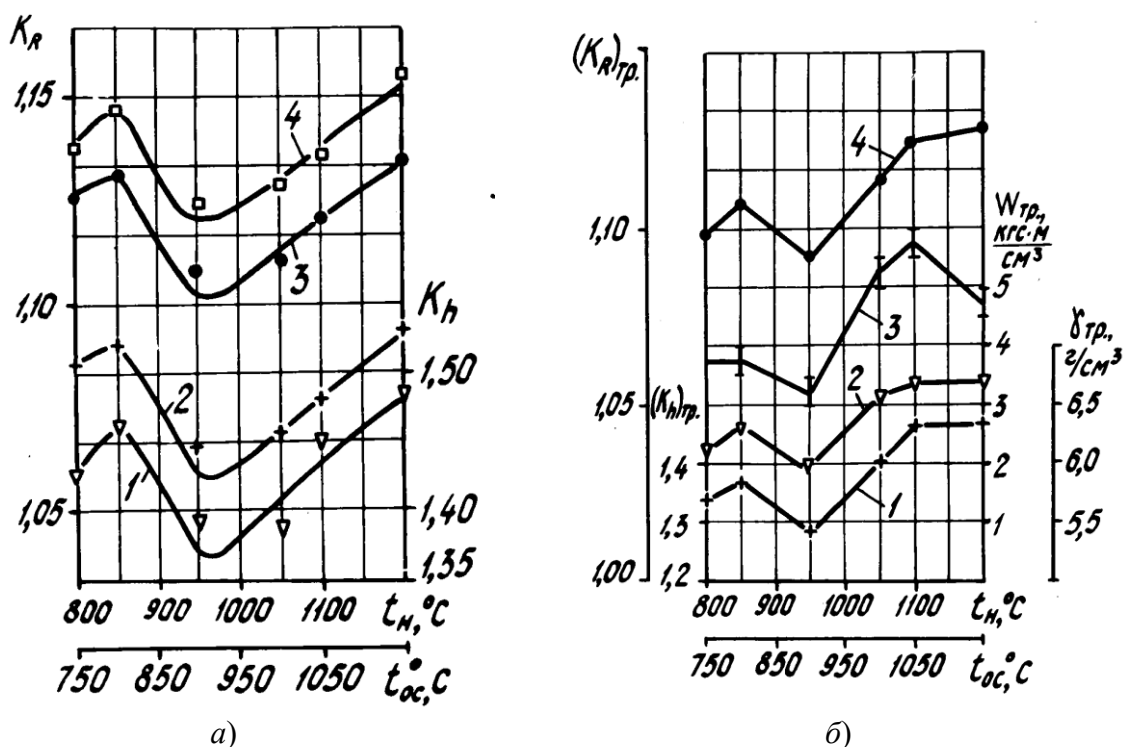


Рисунок 2 – Зависимости высотной  $k_h$  (1, 2) и поперечной  $k_R$  (3, 4) деформаций (а) и деформаций  $(k_h)_{mp}$  (1);  $(k_R)_{mp}$  (4) (б) в момент появления первых трещин от температуры  $t_n^{\circ}\text{C}$  нагрева образцов перед осадкой [Dependences of height  $k_h$  (1, 2) and transverse  $k_R$  (3, 4) deformations (a) and deformations  $(k_h)_{mp}$  (1);  $(k_R)_{mp}$  (4) (b) at the moment of first cracks appearance on temperature  $t_n^{\circ}\text{C}$  of heating samples before upsetting]

Возрастание показателей высотной  $k_h$  и поперечной  $k_R$  деформаций образцов при температурах  $t_{oc} > 900^{\circ}\text{C}$  вызвано увеличением пластичности аустенитной фазы [10].

Для каждой из принятых в экспериментах температуры нагрева  $t_n^{\circ}\text{C}$  (рис. 2, б) проводили осадку порошковых образцов до момента появления разрывов (первых трещин) на его бочкообразной поверхности (рис. 1, б).

Графики изменения показателей высотной  $(k_h)_{mp}$  (1) и поперечной  $(k_R)_{mp}$  (4) деформаций образцов (рис. 2, б) имеют аналогичный характер изменению графиков  $k_h$  и  $k_R$  (рис. 2, а), что в первую очередь связано с неодинаковой пластичностью феррита и аустенита при различных температурах осадки. Меньшая пластичность аустенита

металлического каркаса по сравнению с пластичностью феррита в интервале температур  $t_{oc} = 800 - 900^{\circ}\text{C}$  приводит к уменьшению показателей деформации образца в момент появления первых трещин (рис. 2, б), то есть пластичность порошкового материала уменьшалась.

Для каждой температуры нагрева образцов в момент появления первых трещин определяли удельную работу  $W_{mp}$  деформации и их плотность  $\gamma_{mp}$  (рис. 2, б, графики 3 и 2 соответственно). Очевидно, меньшая пластичность аустенита при температуре  $t_{oc} = 800 - 900^{\circ}\text{C}$  уменьшает значения  $W_{mp}$  и  $\gamma_{mp}$  в момент появления первых трещин.

Выводы:

1. Установлено, что, помимо влияния пористой структуры образцов на пластичность материала, она зависит от пластических свойств структурных составляющих металлической основы образца при определённой температуре (феррита, аустенита) в момент его осадки.

2. Оптимальную температуру деформации порошковых заготовок необходимо выбирать с учётом конечных свойств материала, получаемого динамическим горячим прессованием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колоколов, Е.И. Применимость порошковой стали типа 110Г13П для изготовления деталей уплотнения энергетической арматуры высоких параметров / Е.И. Колоколов, Р.В. Пирожков, С.А. Томилин // В мире научных открытий. – 2014. – № 8(56). – С. 119-130.
2. Пирожков, Р.В. Получение структуры стали 110Г13 методом электроконтактного уплотнения / Р.В. Пирожков, Т.А. Литвинова, С.А. Томилин // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4(5). – С. 49-53.
3. Мецлер, А.А. Особенности формирования высокоплотного материала при электроконтактном уплотнении порошковой бронзы / А.А. Мецлер, Ю.Ю. Медведев, С.А. Томилин, Т.А. Литвинова // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 3(8). – С. 37-41.
4. Синельщиков, В.В. Влияние некоторых технологических факторов динамического горячего прессования на структуру и свойства материала сателлитов дифференциала / В.В. Синельщиков, С.А. Томилин // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2. – URL : [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7450](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7450).
5. Синельщиков, В.В. Исследование пластических свойств нагретых пористых порошковых материалов при испытаниях на изгиб / В.В. Синельщиков // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2. – URL : [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3542](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3542).
6. Синельщиков, В.В. Исследование пластических свойств пористых порошковых материалов в нагретом состоянии при испытаниях на растяжение / В.В. Синельщиков // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 1. – URL : [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3505](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3505).
7. Синельщиков, В.В. Исследование пластичности материалов при осадке цилиндрических нагретых порошковых образцов / В.В. Синельщиков // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 2. – URL : [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5769](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5769).
8. Дзугутов, М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / М.Я. Дзугутов. – Москва : Metallurgy, 1977. – 480 с.
9. Охрименко, Я.М. Теория процессовковки / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин. – Москва : Высшая школа, 1977. – 295 с.
10. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С.С. Горелик. – Москва : Metallurgy, 1967. – 403 с.

#### REFERENCES

- [1] Kolokolov E.I., Pirozhkov R.V., Tomilin S.A. Primenimost' poroshkovej stali tipa 110G13P dlya izgotovleniya detalej uplotneniya energeticheskoy armatury vysokih parametrov [Applicability of Powder Steel of 110G13P Type for Manufacturing of Details of Power Armature Sealing of High Parameters] // V mire nauchnyh otkrytij [In a World of Scientific Discovery]. 2014. № 8 (56). P. 119-130 (in Russian).
- [2] Pirozhkov R.V., Litvinova T.A., Tomilin S.A. Poluchenie struktury stali 110G13 metodom elektrokontaktного uplotneniya [Structure Formation of Steel 110G13 by Electric Contact Sealing]

- Method] // Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety].2012. № 4 (5). P. 49-53 (in Russian).
- [3] Mecler A.A., Medvedev YU.YU., Tomilin S.A., Litvinova T.A. Osobnosti formirovaniya vysokoplotnogo materiala pri elektrokontaktном uplotnenii poroshkovej bronzy [Features of High-Density Material Formation during Electric Contact Compaction of Powder Bronze] // Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety].2013. № 3 (8). P. 37-41 (in Russian).
- [4] Sinel'shchikov V.V., Tomilin S.A. Vliyanie nekotorykh tekhnologicheskikh faktorov dinamicheskogo goryachego pressovaniya na strukturu i svoystva materiala satellitov differenciala [Influence of Some Technological Factors of Dynamic Hot Pressing on Structure and Material Properties of Differential Satellites] // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. 2022. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7450 (in Russian).
- [5] Sinel'shchikov V.V. Issledovanie plasticheskikh svoystv nagretykh poristykh poroshkovykh materialov pri ispytaniyah na izgib [Investigation of Plastic Properties of Heated Porous Powder Materials in Bending Tests] // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3542 (in Russian).
- [6] Sinel'shchikov V.V. Issledovanie plasticheskikh svoystv poristykh poroshkovykh materialov v nagreтом sostoyanii pri ispytaniyah na rastyazhenie [Investigation of Plastic Properties of Porous Powder Materials in Heated State during Tensile Tests] // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. 2016. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3505 (in Russian).
- [7] Sinel'shchikov V.V. Issledovanie plastichnosti materialov pri osadke cilindricheskikh nagretykh poroshkovykh obrazcov [Investigation of Plasticity of Materials during Settling of Cylindrical Heated Powder Samples] // Inzhenernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. 2019. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2019/5769 (in Russian).
- [8] Dzugutov M.YA. Plasticheskaya deformaciya vysokolegirovannykh stalej i splavov. [Plastic Deformation of High-Alloyed Steels and Alloys]. Moskva: Metallurgiya [Moscow : Metallurgy], 1977. 480 p. (in Russian).
- [9] Ohrimenko YA.M., Tyurin V.A. Teoriya processov kovki. [Theory of Forging Processes]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow : Higher School], 1977. 295 p. (in Russian).
- [10] Gorelik S.S. Rekristallizaciya metallov i splavov. [ Recrystallisation of Metals and Alloys] Moskva : Metallurgiya [Moscow : Metallurgy], 1967. 403 p. (in Russian).

## Temperature Influence on Plastic Properties of Porous Material during Sample Settling

V.V. Sinelshchikov<sup>1</sup>, S.A. Tomilin<sup>2</sup>

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

<sup>1</sup>*e-mail: VVSinelshchikov@mephi.ru*

<sup>2</sup>*ORCID iD: 0000-0001-8661-8386*

*Wos Researher ID: G-3465-2017*

*e-mail: SATomilin@mephi.ru*

**Abstract** – The article considers the feasibility of using powder materials for the manufacture of a number of products used in the nuclear power industry. Taking into account high requirements to the products operated in nuclear industry, the questions of studying the properties of materials obtained by powder metallurgy methods and its behaviour in different conditions are topical. Results of investigations on influence of temperature on plastic properties of powder material during hot upsetting of porous cylindrical samples are given. It is established that at temperature of recrystallization (ferrite to austenite transition) plastic properties of porous material decrease.

**Keywords:** dynamic hot pressing, heating temperature, powdered billet, pore, crack, recrystallisation temperature, ferrite, austenite, ductility.