

УДК 621.726

*А.И. Рудской, С.Ю. Кондратьев,
В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УВЛАЖНЕННУЮ ПОРОШКОВУЮ СРЕДУ

*A.I. Rudskoy, S.Yu. Kondratyev,
V.N. Kokorin, N.A. Sizov*

RESEARCH OF THE SEALING PROCESS UNDER ULTRASOUND EXPOSURE ON THE MOISTENED POWDER FIELD

Рассмотрены вопросы консолидации увлажненных железосодержащих дисперсных материалов при обеспечении интенсивного структурообразования. Представлены экспериментальные кривые уплотнения с наложением ультразвукового воздействия. Определена стадийность уплотнения. Предложены физическая и топологическая модели уплотнения увлажненной механической смеси. Проведены металлографические исследования. Проанализированы интегральные величины постадийного структурообразования.

ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ. КРИВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ. СТАДИЙНОСТЬ ПРЕССОВАНИЯ. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ.

There were considered consolidation problems of moistened ferriferous disperse materials while providing intensive structure formation. Showed were experimental sealing curves with application of ultrasound exposure. Defined was the staging of sealing. Physical and topological sealing models of moistened mechanical mixture were proposed. Microscopic metallographic research was made and integral values of stepwise structure formation were analyzed.

POWDER MATERIALS. SEALING CURVES. MULTISTAGE OF COMPRESSION. ULTRASOUND EXPOSURE.

Развитие порошковой металлургии основывается в значительной мере на разработке и использовании новых прогрессивных технологий консолидации дисперсных металлов. Они направлены на существенную минимизацию остаточной пористости и создание благоприятной структуры материала.

Наиболее распространенный вид порошковой продукции конструкционного назначения, используемой в машино- и автомобилестроении, — это детали на стальной основе (углеродистые и легированные) общего назначения [1]. Потребность

промышленности в конструкционных деталях составляет более 60 % всей потребности в металлопорошковых изделиях. Порошковые детали конструкционного назначения должны обладать большими плотностью и прочностью, приближающимися к плотности и прочности деталей, изготовленных из проката и литья. Использование рациональных технологий уплотнения порошков позволило повысить плотность наиболее распространенных порошковых материалов (на железной основе) до 7,4 г/см³, благодаря чему существенно расширилось их использование.

Разработан способ прессования металлического порошка в присутствии жидкой фазы [2, 3] при получении порошковых структур, плотностью приближенных к теоретической в результате перемещения одной из фаз структурно неоднородного гетерофазного материала. Установлено, что при введении жидкости малой вязкости (например, воды, ацетона) в количестве 10–15 % масс. создаются условия формования высокоплотных деталей с остаточной пористостью, не превышающей 3 %, что позволит использовать данную технологию для изготовления сильно нагруженных изделий машиностроительного назначения.

Предложена новая технология прессования увлажненных механических смесей с наложением ультразвуковых колебаний [4], позволяющая интенсифицировать процесс уплотнения дисперсных материалов. Установлено, что при статическом уплотнении гетерофазных увлажненных механических систем с наложением на дисперсную структуру внешнего ультразвукового воздействия в процессе уплотнения создается условие гомогенного распределения частиц порошка, при этом НДС пористого металла характеризуется однородностью. Распределение давления и плотности по объему прессовки становится более равномерным вследствие снижения трения порошка на деформирующий инструмент, а за счет снижения межчастичного трения достигается более плотная упаковка частиц порошка и соответственно более высокая плотность получаемого изделия. Отмечено, что за счет возникновения эффектов кавитации увеличивается растворимость воздуха пор в жидкой фазе механической смеси, позволяющая повысить качество штампующих изделий [5, 6].

В данной работе экспериментально установлены общие закономерности поэтапного уплотнения гетерофазных увлажненных механических систем. Выбор материалов для экспериментального исследования процессов уплотнения был обусловлен тем, что изделия из порошков на основе железа являются наиболее распространенным видом металлопорошковой продукции конструкционного назначения, используемой в машино- и автомобилестроении.

Методика эксперимента

В экспериментальных исследованиях использован железный распыленный порошок марки АНС100.29 фирмы «Höganäs» (Швеция), характеристики которого следующие:

Химический состав (масс. %, не более)

Fe	основа
C	0,024
O ₂ (при нагреве в Н ₂)	0,17

Гранулометрический состав

Размер, мкм	Содержание, %
250–200	0–2
200–100	0–12
100–71	Ост.
71–45	Ост.
Менее 45	10–30

Технологические свойства

Насыпная плотность, г/см ³	2,95
Текущность, сек/50 г	25

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника ультразвуковых колебаний использовался магнито-стрикционный вибратор с собственной частотой колебаний 18,6 кГц. Возбуждение вибратора про-

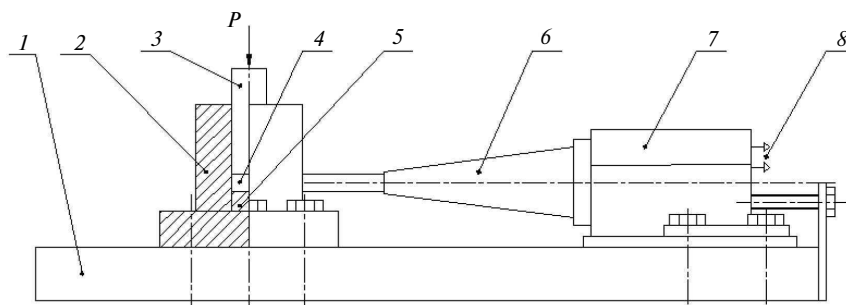


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — плита для крепления; 2 — матрица; 3 — деформирующий пуансон; 4 — прессуемый порошок; 5 — нижний пуансон; 6 — УЗ-концентратор; 7 — магнито-стрикционный преобразователь; 8 — подключение УЗ-генератора

изводилось ламповым генератором мощностью 250 Вт. Прессование заготовок осуществлялось на испытательной машине УМ-50.

Изучение порового пространства и микро-структуры образцов проводилось на микроскопе МИМ-8 с увеличением 200–400 (для фиксации изображения использован цифровой фотоаппарат). Образцы, соответствующие характерным стадиям уплотнения, заливались в пластмассу с использованием прибора «Presto-press», затем подвергались последовательному шлифованию на крупнозернистой, среднезернистой и мелкозернистой наждачной бумаге. Окончательная доводка образцов проводилась полированием (шероховатость поверхности $Ra = 0,2–0,4$ мкм).

Результаты исследований и их обсуждение

В результате анализа экспериментальных данных построены кривые уплотнения (рис. 2) и определена стадийность уплотнения с использованием метода фиксирования характерных этапов структурообразования [7].

При анализе кривых уплотнения отмечено существенное отличие характера кривых для увлажненных гетерофазных механических смесей, а также установлено изменение границ

стадий прессования. На второй стадии прессования наблюдается резкое увеличение плотности прессуемого изделия (от 4,5 до 6,5 г/см³) при давлении 200 МПа. При прессовании сухого порошка данный уровень плотности достигается лишь на третьей стадии при давлении 550 МПа. Это явление позволяет существенно снизить энергосиловые параметры используемого оборудования при изготовлении деталей конструкционного назначения. На пятой стадии прессования достигается плотность 7,69 г/см³, что соответствует 99 % теоретической плотности компактного материала.

На основании экспериментов по изучению градиентного пороструктурирования предложены физическая (рис. 3) и топологическая (рис. 4) модели уплотняемой структурно неоднородной механической смеси с наличием жидкой фазы (железный порошок марки АНС100.29 «Höganäs» с заполняющей средой (вода)) при наложении УЗ-колебаний [5]. Анализ изменения порового пространства в зависимости от стадии прессования представлен на рис. 5.

В экспериментальных исследованиях по изучению явления межчастичного сращивания в процессах, сопровождающихся интенсивным структурным уплотнением на третьей, четвертой

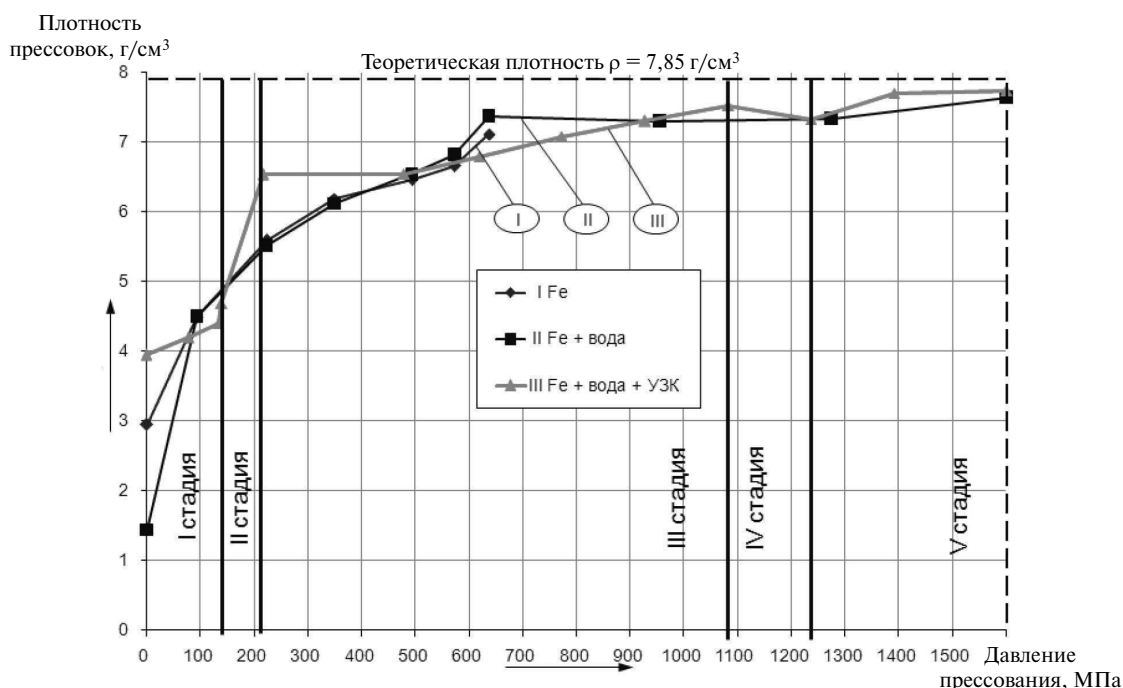


Рис. 2. Экспериментальные кривые уплотнения

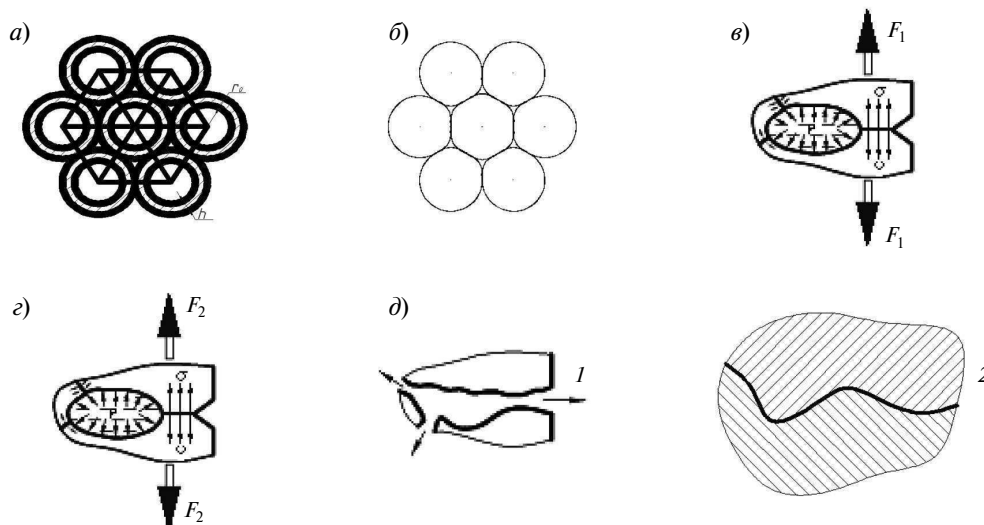


Рис. 3. Физическая модель постадийного уплотнения: а) первая стадия, б) вторая стадия, в) третья стадия, г) четвертая стадия ($F_2 > F_1$, $V_2 < V_1$), д) пятая стадия (1 — разрушение; 2 — консолидация контактов)

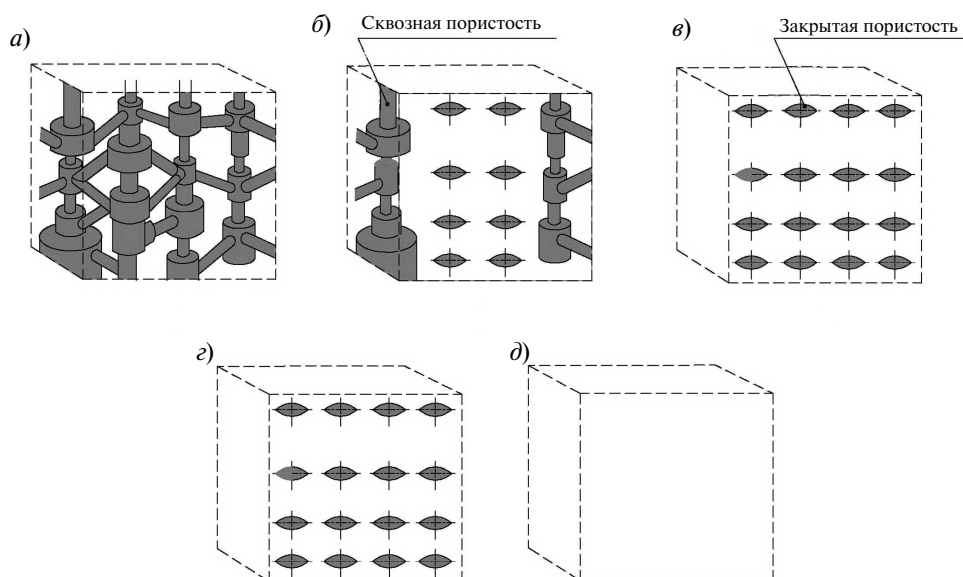


Рис. 4. Имитационная модель топологии порового пространства уплотняемой механической трехфазной смеси: а — первая стадия; б — вторая стадия; в — третья стадия; г — четвертая стадия; д — пятая стадия

и пятой стадиях, а также структурной деформацией на первой и второй стадиях, был проведен анализ структурообразования с использованием методов металлографического исследования. В работе использовали цилиндрические образцы, соответствующие характерным стадиям

уплотнения, полученные прессованием и спеканием в среде эндогаза.

Микроструктуру образцов (рис. 6) изучали, используя программу «SIAMS 700» и анализатор изображений, при помощи которого получали гистограммы размера зерна феррита.

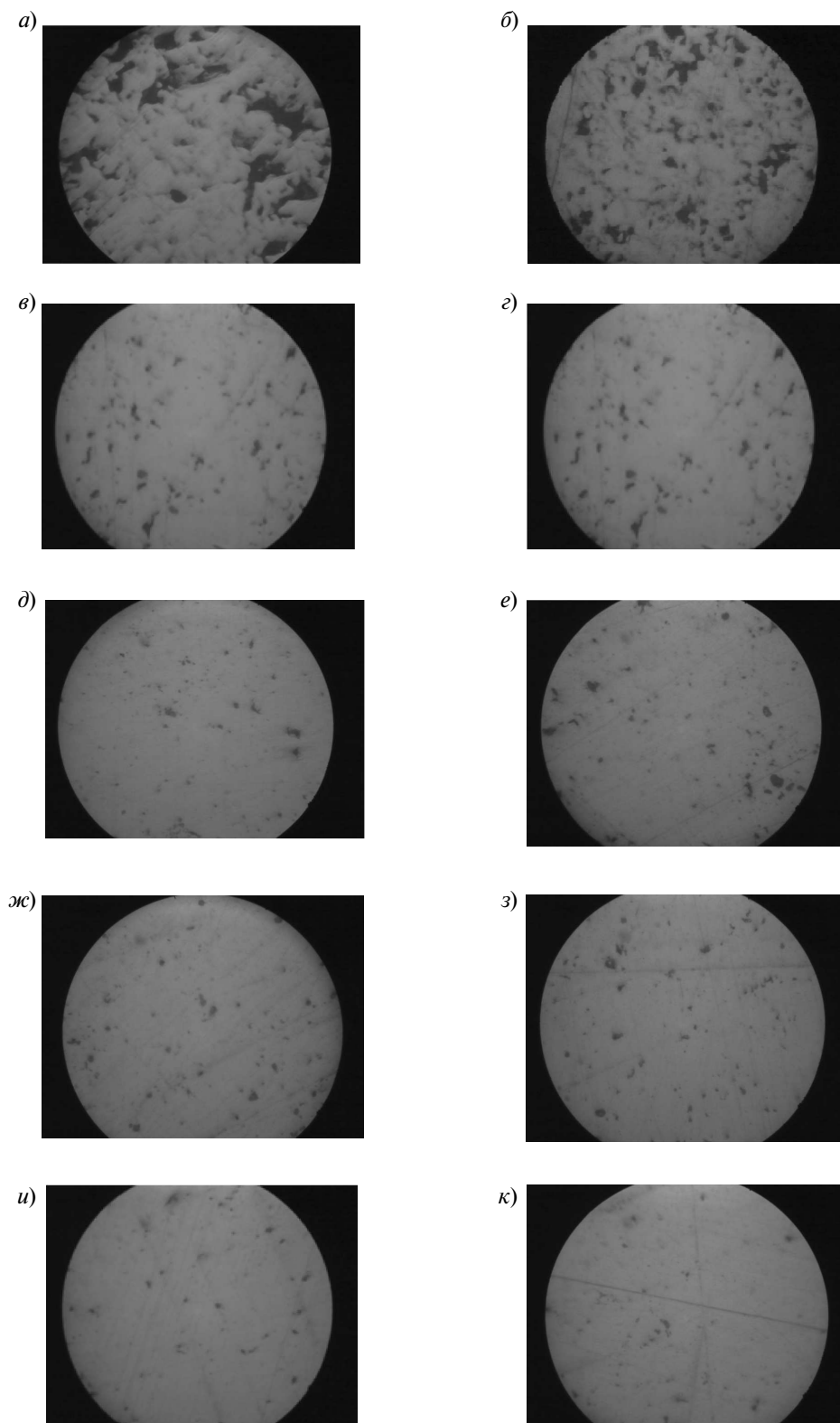


Рис. 5. Первая (а, б), вторая (в, г), третья (д, е), четвертая (ж, з) и пятая (и, к) стадии прессования железного порошка с жидкой составляющей (вода) с наложением УЗ-колебаний: слева (а, б, д, ж, и) — центральная часть, справа (б, г, е, з, к) — периферийная зона

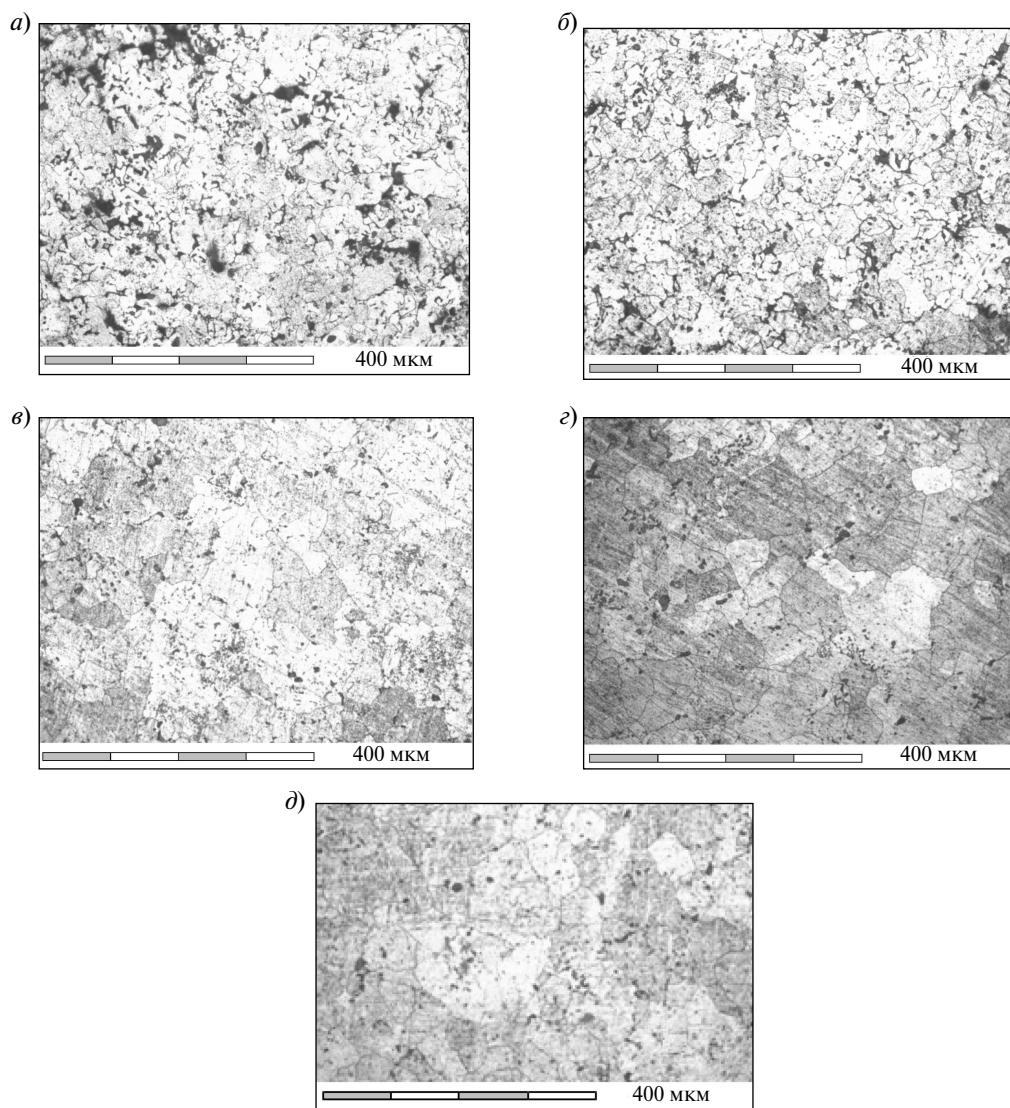


Рис. 6. Микроструктура образцов при постадийном деформировании, $\times 200$:
 а) первая стадия; б) вторая стадия; в) третья стадия; г) четвертая стадия; д) пятая стадия

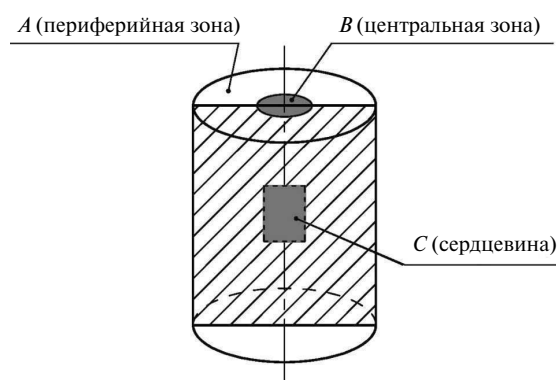


Рис. 7. Зональная схема изучения структуры
 (схема разделения образцов по характерным участкам)

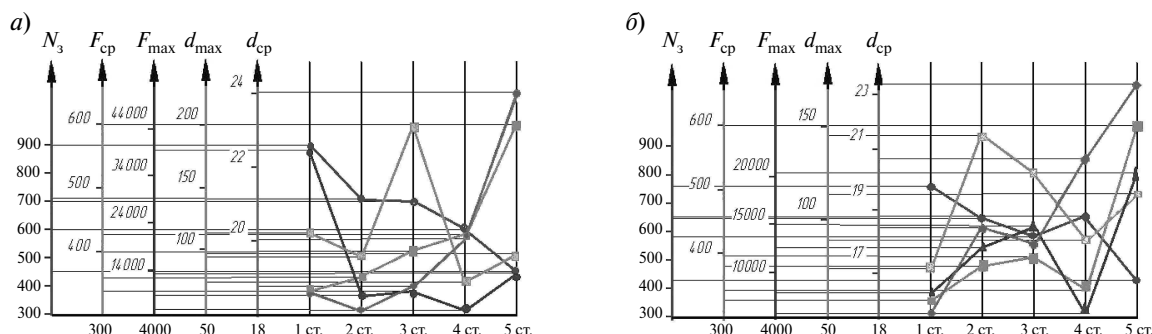


Рис. 8. Интенсивность образования мозаичной блочной структуры периферийной зоны (а) и сердцевины (б)

Структурное исследование проводили, применяя зонную схему анализа (рис. 7), выделяя нормальную плоскость (центральная и периферийная зоны) и меридиональную плоскость (сердцевина).

В ходе исследования анализировались: средняя площадь зерна феррита, мкм^2 ; площадь наибольшего зерна, мкм^2 ; средний балл зерна; баллы максимального и минимального зерен; балл по наибольшей доли величин зерен, находящихся на площади анализа. Относительная погрешность измерений составляла 1–5 %. На рис. 8 представлен анализ интенсивности образования мозаичной блочной структуры в характерных зонах образца (зоны А, С на рис. 7).

Отношение площадей наибольшего зерна структуры пятой стадии к площади наибольшего зерна структуры четвертой стадии составило

$$\frac{S_{\max}^5}{S_{\max}^4} = \frac{21156,8 \text{ мкм}^2}{5257,5 \text{ мкм}^2} = 4,02 > [n] = 1,5; \text{ нормативные значения } [n] \text{ соответствуют преодолению энергетического барьера сращивания межзеренных контактов [2].}$$

Таким образом, установлено явление межчастичного сращивания на завершающих стадиях интенсивного прессования (уплотнения), что обуславливает существенное повышение уровня физико-механических свойств отпрессованных заготовок.

Исследование твердости проводили на образцах, полученных на пятой стадии уплотнения (образцы имели следующие геометрические соотношения: $1 < H/d < 3$), по характерным сечениям образца в ортогональных направлениях. Анализ результатов механических испытаний позволил установить высокий уровень однородности структуры — разброс значений твердости

не превышал 7 %. Уровень твердости структуры соответствует твердости беспорового материала (феррита) — $HB\ 60\text{--}100$.

Разработан способ уплотнения увлажненных сред с ультразвуковым воздействием, позволяющий интенсифицировать консолидацию порошковых сред при получении высокоплотных изделий.

Изучение поровой структуры с использованием методов металлографического анализа и физического материаловедения позволило установить объем, структуру, типоразмеры и топологию пор. Подтверждено, что на пятой стадии уплотнения наблюдается структура теоретической плотности; при этом установлен характер образования и последовательность развития межзеренных и межчастичных контактов: равновесное состояние — неравновесное — равновесное.

Установлено явление межчастичного сращивания на завершающих стадиях интенсивного прессования (уплотнения) при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду, что определяет существенное повышение уровня физико-механических свойств отпрессованных заготовок.

Анализ структурообразования позволил установить, что на четвертой и пятой стадиях уплотнения наблюдается интенсивный рост зерен за счет объединения в единый конгломерат смежных зерен (межкристаллитное сращивание).

Установлено повышение однородности структуры и увеличение уровня механических свойств заготовок, полученных прессованием увлажненных порошковых сред с наложением ультразвукового воздействия.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермаков, С.С.** Порошковые стали и изделия [Текст] / С.С. Ермаков. — Л.: Машиностроение, 1990. — 319 с.
2. **Патент 2399458 РФ.** Способ прессования высокоплотных заготовок и деталей из металлического порошка в присутствии жидкой фазы [Текст] / В.Н. Кокорин. — Оpubл.: 2010. — Бюл. № 26.
3. **Кокорин, В.Н.** Разработка технологии прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа для получения высокоплотных заготовок [Текст]: дис. ... докт. тех. наук: 05.16.06 / Кокорин Валерий Николаевич. — Санкт-Петербург, 2011. — 336 с.
4. **Кокорин, В.Н.** Способ прессования с наложением уз-воздействия увлажненных механических смесей на основе железа [Текст] / В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов, Н.А. Сизов, Д.П. Груздев // Вестник УлГТУ. — Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. — № 3. — С. 24–27.
5. **Рудской, А.И.** Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа [Текст] / А.И. Рудской, В.Н. Кокорин, В.И. Филимонов, Е.М. Булыжев, С.Ю. Кондратьев. — Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. — 246 с.
6. **Кокорин, В.Н.** Способ прессования увлажненных порошков с использованием УЗК колебаний [Текст] / В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // 45 НТК «Вузовская наука в современных условиях». — Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2011. — С. 56–57.
7. **Кокорин, В.Н.** Стадийность прессования увлажненных порошков [Текст] / В.Н. Кокорин, Н.А. Сизов // 45 НТК «Вузовская наука в современных условиях». — Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2011. — С. 59–60.

REFERENCE

1. **Ermakov, S.S.** Poroshkovye stali i izdeliia [Tekst] / S.S. Ermakov. — L.: Mashinostroenie, 1990. — 319 s. (rus.)
2. **Patent 2399458 RF.** Sposob pressovaniia vysokoplotnykh zagotovok i detalei iz metallichesкого poroshka v prisutstvii zhidkoi fazy [Tekst] / V.N. Kokorin. — Opubl: 2010. — Biul. №26. (rus.)
3. **Kokorin, V.N.** Razrabotka tekhnologii pressovaniia geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesei na osnove zheleza dlia polucheniia vysokoplotnykh zagotovok [Tekst]: dis. — dokt. tekhn. nauk: 05.16.06 / Kokorin Valerii Nikolaevich. — Sankt-Peterburg., 2011. — 336 s. (rus.)
4. **Kokorin V.N., Filimonov V.I., Sizov N.A., Gruzdev D.P.** Sposob pressovaniia s nalozheniem uz-vozdvoistviia uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesei na osnove zheleza [Tekst] // Vestnik UIGTU. — Ul'ianovsk: UIGTU, 2012. — № 3. — S. 24–27. (rus.)
5. **Rudskoi, A.I.** Teoriia i praktika protsessa pressovaniia geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesei na osnove zheleza [Tekst] / A.I. Rudskoi, V.N. Kokorin., V.I. Filimonov, E.M. Bulyzhev, S.Iu.Kondrat'ev. — Ul'ianovsk: UIGTU, 2012. — 246 s. (rus.)
6. **Kokorin, V.N.** Sposob pressovaniia uvlazhnennykh poroshkov s ispol'zovaniem UZK kolebaniia [Tekst] / V.N. Kokorin, N.A. Sizov // 45 NTK «Vuzovskaiia nauka v sovremennykh usloviakh». — Ul'ianovsk: UIGTU. — 2011. — S. 56–57. (rus.)
7. **Kokorin V.N., Sizov N.A.** Stadiinost' pressovaniia uvlazhnennykh poroshkov [Tekst] // 45 NTK «Vuzovskaiia nauka v sovremennykh usloviakh». — Ul'ianovsk: UIGTU. 2011. — S. 59–60. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS

РУДСКОЙ Андрей Иванович — доктор технических наук профессор, член-корреспондент РАН ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: rector@spbstu.ru

RUDSKOY Andrey I. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: rector@spbstu.ru

КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

KONDRAT'YEV Sergey Yu. — St.-Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

КОКОРИН Валерий Николаевич — доктор технических наук заведующий кафедрой материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета; 432027, ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия; e-mail: vnkokorin@mail.ru

KOKORIN Valeriy N. — Ulyanovskiy State Technical University; 432027, Severniy Venec Str. 32, Ulyanovsk, Russia; e-mail: vnkokorin@mail.ru

СИЗОВ Николай Александрович — аспирант кафедры материаловедения и обработки металлов давлением Ульяновского государственного технического университета; 432027, ул. Северный Венец, 32, Ульяновск, Россия; e-mail: vnkokorin@mail.ru

SIZOV Nikolay A. — Ulyanovskiy State Technical University; 432027, Severniy Venec Str. 32, Ulyanovsk, Russia; e-mail: vnkokorin@mail.ru