

УДК 621.785.5

Т. В. Высоцкий, В. Т. Высоцкий, канд. техн. наук, доц.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ НИХ**

В работе представлен технологический процесс изготовления пористых материалов и изделий из механически легированных порошковых сталей и общие рекомендации по применению данного технологического процесса в условиях мелкосерийного и ремонтного производств, а также подробно рассмотрен технологический процесс получения компактных механически легированных порошковых сталей различного назначения.

Целью работы являлась разработка технологического процесса изготовления пористых и компактных материалов и деталей из механически легированных порошковых сталей. Известно положительное влияние механического легирования на свойства материалов на основе железного порошка: получение более равновесной структуры, повышение физико-механических свойств, таких как прочность при растяжении, ударная вязкость, твердость. Собственными исследованиями установлена принципиальная возможность применения механического легирования для получения пористых материалов и изделий из них [1–5]. Единственным и, пожалуй, серьезным недостатком, ограничивающим, а то и исключающим возможность применения механического легирования для получения пористых материалов и изделий, является крайне низкая прессуемость механически легированной шихты. Установлено, что механически легированные порошки на основе железа не поддаются прессованию и получить из них пористые материалы и изделия практически невозможно. Максимально возможное содержание механически легированного компонента в шихте не должно превышать по массе 30 % [5].

Проведенные исследования позволили разработать технологические процессы изготовления пористых деталей и материалов на основе железного порошка с применением метода механического легирования. Отличительной особенностью технологических процессов является то,

что они могут быть реализованы на любом машиностроительном предприятии, так как не требуют применения специального термического оборудования, необходимого при изготовлении деталей и материалов методом порошковой металлургии по традиционной технологии, и могут широко применяться для условий мелкосерийного и ремонтного производств, что весьма немаловажно, так как в ряде случаев позволяет отказаться от дорогостоящих закупок деталей по импорту.

При проведении исследований для разработки технологических процессов авторы использовали два метода легирования:

- *обычное легирование*, которое предусматривало получение шихты из исходных компонентов в смесителе со смещенной осью, либо конусного типа;
- *механическое легирование*, которое заключалось в получении шихты из лигатуры в камере высокоэнергетического смесителя вибрационного типа.

Приводим описание разработанной технологии (в зависимости от назначения, условий работы и конструктивных форм деталей часть операций может быть исключена, или может быть изменен порядок их выполнения).

*Операция 000. Контрольная.* На операции производят отбор проб основного компонента шихты – железного порошка ПЖРВ–3 (ГОСТ 9849–86) и контроль содержания кислорода в пробах химическим методом согласно

ГОСТ 16412–80. Для выполнения операции необходимо взять три пробы порошка массой по 50 г. Содержание кислорода в каждой пробе должно быть не более 1 %. При большем содержании кислорода железный порошок подлежит либо довосстановлению в среде диссоциированного аммиака, либо выбраковке, т. к. повышенное содержание кислорода препятствует нормальному протеканию ряда процессов при изготовлении материалов и деталей и приводит к снижению механических свойств изделий.

*Операция 005. Шихтоприготовительная.* В случае использования метода механического легирования операция состоит из следующих переходов:

а) 005–1 – *просеивание компонентов шихты:* железный порошок необходимо просеять через сита с размерами ячеек 0,16 и 0,08 мм и использовать для изготовления деталей именно эту фракцию; остальную массу порошка других фракций можно использовать для изготовления других деталей. Порошки легирующих элементов необходимо просеять через сита 0,05 и 0,02 мм. Указанный переход необходим для отделения недопустимых крупных включений: скомковавшихся оксидов, различных загрязнений и др.;

б) 005–2 – *приготовление лигатуры:* необходимо для получения лигатуры определенного химического состава. Производят выполнение перехода в высокоэнергетическом смесителе в течение 6 ч. Химический состав лигатуры зависит от марки необходимой стали при производстве изделий и материалов. В качестве примера приведем состав компонентов на 250 г лигатуры для сталей 05МН2 и 06ХН2 при ее 30-процентном введении в основу – железный порошок ПЖРВ:

1) для стали 05МН2: 227,52 г порошка железа; 5,83 г порошка молибдена; 16,65 г порошка никеля;

2) для стали 06ХН2: 205,60 г порошка железа; 27,75 г порошка стали ПХ30–1; 16,65 г порошка никеля.

Для получения деталей из других марок сталей необходимо использовать

соответствующие расчеты;

в) 005–3 – *взвешивание компонентов шихты:* необходимо для получения материала определенного химического состава. Процентное содержание основы (железного порошка) и легирующих элементов определяют в массовом соотношении;

г) 005–4 – *смешивание порошков железа и лигатуры (либо порошков железа и легирующих элементов):* производят в смесителе со смещенной осью либо конусного типа в течение 2 ч. Содержание лигатуры в основе должно составлять не более 30 %. После окончания перехода шихту выгружают в закрытую тару, на которую прикрепляют бирку с указанием марки материала, даты приготовления и фамилии рабочего. Хранить шихту нужно в плотно закрытой таре в сухом отапливаемом помещении не более 7 сут.

При изготовлении материалов по методу обычного легирования переход 005–2 не выполняли, а шихту получали смешиванием исходных компонентов в смесителе со смещенной осью.

Для изготовления различных конструкционных деталей (втулки, кольца, собачки, звездочки) можно рекомендовать по результатам исследований стали 05МН2 (0,7 % Мо и 2 % Ni) и 06ХН2 (1 % Cr; 2 % Ni).

*Операция 010. Дозировочная.* Для получения детали с определенной пористостью необходимо взять навеску определенной массы. Масса навески зависит от объема детали (заготовки), необходимой пористости и плотности применяемого шихтового материала.

Массу заготовки (навески порошковой шихты) определяют из выражения

$$P = \rho_{\text{ш}} \cdot V \cdot \left( \frac{100 - \gamma}{100} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность шихтового материала, г/см<sup>3</sup>;  $V$  – объем заготовки, см<sup>3</sup>;  $\gamma$  – пористость заготовки, %.

Плотность шихтового материала

определяют по формуле

$$\rho_{\text{ш}} = \frac{[\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3 \cdot \dots \cdot \rho_n \cdot 100]}{[\rho_1 \cdot \rho_2 \cdot \rho_3 \cdot \dots \cdot \rho_n + P_2 \cdot \rho_1 \times \times \rho_3 \cdot \dots \cdot \rho_n + \dots + P_n \cdot \rho_1 \cdot \rho_2 \times \times \rho_3 \cdot \dots \cdot \rho_{n-1}]}, \quad (2)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_n$  – плотность исходных компонентов, входящих в шихтовую смесь, г/см<sup>3</sup>;  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$  – содержание каждого компонента шихты, %.

Дозировку шихты необходимо производить весовым методом – взвешиванием на технических весах с верхним пределом измерения до 1 кг (ГОСТ 23676–86) при величине производственной партии до 200 шт. или объемным, с применением специально изготовленных мерников (при величине партии свыше 200 шт.). Точность взвешивания составляет  $\pm 0,05$  г.

*Операция 015. Прессовая.* Оптимальным методом формования пористых заготовок и деталей является двустороннее прессование в съемных стальных пресс-формах по упорам при давлении на площадь прессуемой поверхности 780 МПа. В качестве оборудования необходимо использовать пресс, обеспечивающий указанное давление.

*Операция 020. Контрольная.* На операции производят визуальный контроль всех прессовок. Не допускаются трещины, следы расслоения, сколы, осыпание кромок, посторонние включения.

*Операция 025. Спекальная.* На операции производят спекание заготовок, совмещая его с цементацией в древесно-угольном карбюризаторе (ГОСТ 2407–83). Состав насыщающей смеси – одна объемная часть свежего и три объемные части отработанного карбюризаторов. Отработанный карбюризатор получают отжигом свежего при температуре 1000 °С в течение 2 ч. Спекание производят в специальных цементационных контейнерах, в которые помещают прессовки, пересыпая их цементационной смесью. Для исследованных материалов режим спекания, совмещенного с науглероживанием:

– сталь 05МН2 – температура 1000 °С, продолжительность 6 ч;

– сталь 06ХН2 – температура 1050 °С, продолжительность 6 ч с момента сквозного прогрева контейнера.

Порядок упаковки контейнера общеизвестен квалифицированному персоналу термических участков и цехов.

После спекания контейнеры извлекают из печи, охлаждают на воздухе до температуры 50 °С и вскрывают. Спеченные детали отделяют от карбюризатора и укладывают в тару. После проведения операции цементационная смесь представляет собой отработанный карбюризатор. Ее можно использовать для следующей партии заготовок, добавляя соответствующее количество свежего карбюризатора. В качестве оборудования можно использовать любую печь с окислительной атмосферой.

Для спекания допустимо также применять газовые процессы цементации и нитроцементации с контролируемой и регулируемой атмосферой в специальных печах (например, в безмуфельных агрегатах типа ЗИЛ).

*Операция 030. Контрольная.* На операции известными способами контролируют качество спекания, микроструктуру деталей, твердость и подлежащие проверке геометрические размеры.

*Операция 035. Термическая.* На операции производят (в случае необходимости) термическую обработку: закалку и низкий отпуск. Нагрев изделий под закалку производят в засыпках из отработанного карбюризатора.

Температура закалки: для стали 05МН2 – 800–820 °С, для стали 06ХН2 – 800–830 °С, охлаждение в масле. Температура отпуска составляет 180–200 °С. При газовой цементации и нитроцементации режимы обработки должны соответствовать принятым в термических цехах при обработке изделий из компактных материалов. Необходимо указать на обязательное условие проведения закалки: нагрев должен быть либо высокоскоростным (закалка с нагревом

ТВЧ), либо безокислительным (нагрев в безокислительных средах).

*Операция 040. Механическая обработка.* Необходимость в механической обработке может быть обусловлена двумя причинами: наличием на детали элементов, которые трудно или невозможно получить при прессовании заготовок – различного рода лыски, поперечные канавки и отверстия, фаски и др. (их получение значительно усложняет конструкцию пресс-форм либо делает получение прессовки невозможным); либо высокой точностью размеров деталей (качества 6–7) и малой шероховатостью рабочих поверхностей ( $R_a = 2,5 \dots 1,25$  мкм).

Механическую обработку деталей можно проводить как лезвийными, так и абразивными инструментами всеми известными способами: точением, фрезерованием, сверлением, протягиванием, развертыванием, шлифованием и т. д., при этом лезвийную обработку проводят, как правило, перед, а абразивную – после операции термообработки.

*Операция 045. Контрольная.* На операции производят контроль готовых изделий на предмет соответствия требованиям чертежа.

Свойства материалов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Свойства пористых сталей

Марка материала	Прочность при растяжении, МПа	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Твердость НВ	Твердость HRC
<i>После цементации</i>				
Железо	445	98	105	–
05МН2	461 / 524	99 / 137	170 / 170	–
06ХН2	480 / 580	98 / 120	175 / 180	–
<i>После цементации и термической обработки</i>				
Железо	451	65	–	25
05МН2	489 / 600	78 / 81	–	46 / 47
06ХН2	492 / 616	75 / 80	–	45 / 47
Примечание – В числителе указаны данные, полученные при обычном легировании; в знаменателе – при механическом легировании				

Разработанный технологический процесс можно реализовать в различных отраслях промышленности при производстве деталей с одновременным снижением затрат на материалы и значительным сокращением трудоемкости механической обработки.

Проведенные предварительные исследования показали также возможность применения метода механического легирования при производстве компактных порошковых сталей различных классов:

цементуемых, улучшаемых, нержавеющей [6–10], что позволило разработать технологический процесс их получения.

Приведем подробное описание и порядок проведения операций техпроцесса.

*Операция 000. Контрольная.* Данная операция ничем не отличается от аналогичной операции при производстве пористых механически легированных материалов и изделий из них.

*Операция 005. Шихтоприготовительная.* Операция содержит ряд переходов:

– 005–1 – просеивание компонентов шихты: порошок железа через сита 0,08–0,16 мм; порошки легирующих элементов можно использовать в состоянии поставки после просеивания через сито 0,05 мм. Последнее необходимо для удаления различных примесей: скомковавшихся частиц, инородных включений, загрязнений и др.;

– 005–2 – взвешивание компонентов шихты: необходимо для получения стали определенной марки и химического со-

става. В каждом конкретном случае в зависимости от марки стали необходимо произвести соответствующий расчет процентного содержания компонентов. В качестве примера приводим содержание всех компонентов для получения 250 г шихты при производстве сталей различных марок и назначения (табл. 2);

– 005–3 – размол компонентов шихты в высокоэнергетическом смесителе в течение 6 ч;

– 005–4 – выгрузка шихты в тару. Шихту необходимо хранить в плотно закрытой таре не более 7 сут.

Табл. 2. Состав шихты

Марка стали	Содержание компонентов по массе, г
05МН2	Fe – 243,25; Mo – 1,75; Ni – 5
40МН2	Fe – 242,38; Mo – 1,75; Ni – 5; Гр – 0,87
06ХН2	Fe – 236,67; Ni – 5; ПХ30–1 – 8,33
40ХН2	Fe – 235,82; Ni – 5; ПХ30–1 – 8,33; Гр – 0,85
20Х18Н9	Fe – 77,5; Ni – 22,5; ПХ30–1 – 150
40Х13	Fe – 141,1; ПХ30–1 – 108,3; Гр – 0,6
95Х18	Fe – 98; ПХ30–1 – 150; Гр – 1,87
Примечание – Гр – графит карандашный либо серебристый; ПХ30–1 – железный порошок, содержащий 30 % хрома	

*Операция 010. Прессовая.* На операции производят формование брикетов для последующего компактирования. Операция содержит следующие переходы: изготовление фольговых стаканов; засыпка в стаканы доз шихты; установка стаканов в полость матрицы; прессование и выталкивание брикетов. В результате выполнения операции получают брикеты с плотностью 80...82 % от теоретической. Необходимость выполнения данной операции объясняется тем, что подвергнутую размолу в высокоэнергетическом смесителе шихту (операция 005–3) совершенно невозможно прессовать для последующей переработки.

*Операция 015. Прессовая.* На операции производят компактирование брикетов. При разработке технологии производили горячую экструзию брикетов в прутки при степени обжатия (по площади) 11,6 раза. Операция содержит следующие переходы:

– нагрев брикета в безокислительной атмосфере, либо высокоскоростной нагрев до температуры 1140–1180 °С (в зависимости от марки стали);

– компактирование.

Вполне возможно при проведении компактирования применение других

методов: ковки, штамповки, горячего прессования, прокатки. Важнейшим условием проведения компактирования является исключение окисления полуфабриката, полученного на операции 010.

*Операция 020. Контрольная.* На операции производят определение физико-механических свойств полученных материалов: прочности при растяжении, относительного удлинения, ударной вязкости,

твердости и др. При необходимости исследуют микроструктуру и измеряют микротвердость, определяют фазовый и химический составы материалов. При выполнении данной операции необходимо использовать общепринятые методики и оборудование.

Свойства полученных компактных сталей приведены в табл. 3.

Табл. 3. Свойства компактных сталей

Марка стали	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HRB
05МН2	479 / 555	11 / 10	80...82 / 83...85
40МН2	630 / 745	8 / 6	85...87 / 87...89
06ХН2	495 / 640	10 / 8	82...85 / 85...87
40ХН2	620 / 680	6 / 5	86...90 / 90...93
20Х18Н9	600 / 670	8 / 7	80...82 / 82...85
40Х13	620 / 690	6 / 5	80...82 / 89...92
95Х18	670 / 700	8 / 5	85...90 / 90...95

Примечание – В числителе указаны данные, полученные при обычном легировании; в знаменателе – при механическом легировании

Исследованиями доказано, что материалы, полученные при обычном легировании, по сравнению с материалами, полученными при механическом легировании, имеют более низкие значения прочностных характеристик, однако можно отметить несколько большее относительное удлинение обычно легированных материалов. Объяснить отмеченное явление позволяет изучение микроструктур материалов.

Установлено, что структура материалов, полученных при применении механического легирования, отличается от структуры материалов, полученных при обычном легировании, большей однородностью и меньшим размером зерен. Для примера приводим микроструктуру компактных сталей 40МН2 и

40ХН2. Во всех случаях структура стали, полученной с применением метода механического легирования, более равновесна и более мелкозерниста, что в целом и объясняет получение более высоких физико-механических свойств материалов (рис. 1). Все это наблюдается и при исследовании структур материалов других составов.

Разработанные технологические процессы необходимо рекомендовать для изготовления различных деталей машиностроительного производства, так как при их использовании можно получать материалы различного назначения. Проведенное исследование показывает возможность применения метода механического легирования для получения конструкционных сталей.

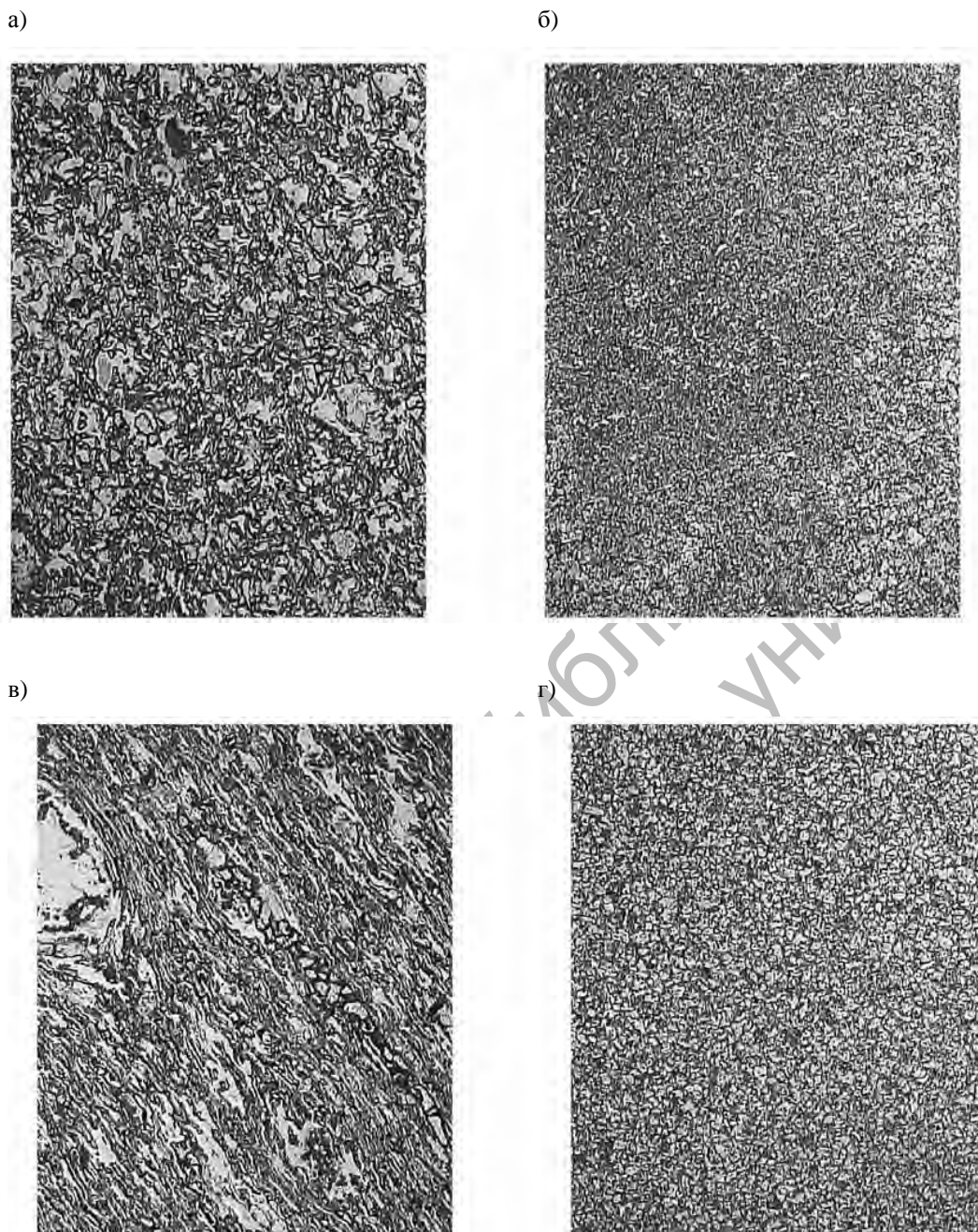


Рис. 1. Микроструктуры компактных сталей 40Mn2 (а, б) и 40XN2 (в, г), полученных при обычном (а, в) и механическом (б, г) легировании

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Высоцкий, В. Т.** Влияние механического легирования на свойства материалов на основе железного порошка / В. Т. Высоцкий, Т. В. Высоцкий // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 1. – С. 22–26.

2. **Высоцкий, Т. В.** Цементация механически легированных порошковых железомолибденникелевых материалов / Т. В. Высоцкий, Г. Ф. Ловшенко, В. Т. Высоцкий // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы

междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГТУ, 2003. – С. 140–142.

3. **Высоцкий, Т. В.** Цементация механически легированных порошковых железохромистых материалов / Т. В. Высоцкий // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы респ. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – С. 24.

4. **Высоцкий, Т. В.** Цементация хромоникелевых порошковых сталей / Т. В. Высоцкий //

Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы респ. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – С. 25.

5. **Высоцкий, Т. В.** Влияние режима размола на технологические свойства железного порошка / Т. В. Высоцкий, Г. Ф. Ловшенко, В. Т. Высоцкий // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГТУ, 2003. – С. 143–145.

6. **Ловшенко, Г. Ф.** Исследование процесса получения компактных механически легированных среднеуглеродистых сталей / Г. Ф. Ловшенко, Т. В. Высоцкий // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 1. – С. 101–104.

7. **Высоцкий, Т. В.** Исследование процесса получения компактных механически легированных сталей / Т. В. Высоцкий, В. Т. Высоцкий, Г. Ф. Ловшенко // *Материалы, оборудование и*

*ресурсосберегающие технологии* : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – С. 158–159.

8. **Ловшенко, Г. Ф.** Исследование процесса получения и свойств механически легированных нержавеющей сталей / Г. Ф. Ловшенко, Т. В. Высоцкий // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии* : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – С. 169–170.

9. **Ловшенко, Г. Ф.** Механически легированные нержавеющей стали и их свойства / Г. Ф. Ловшенко, Т. В. Высоцкий // *Композиционные материалы в промышленности* : сб. науч. тр. – Ялта, 2005. – С. 346–347.

10. **Ловшенко, Г. Ф.** Исследование свойств механически легированных сталей / Г. Ф. Ловшенко, Т. В. Высоцкий // *Композиционные материалы в промышленности* : сб. науч. тр. – Ялта, 2005. – С. 345–346.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 25.02.2008

**T. V. Vysotsky, V. T. Vysotsky**  
**Technological processes of production**  
**of mechanically alloyed powder-based**  
**steels and their products**

This paper introduces the technological process of manufacturing porous materials and products of mechanically alloyed powder-based steels and gives common recommendations on application of the given technological process in conditions of small-scale and repair production. The technological process of production of compact mechanically alloyed various purpose powder-based steels is considered in details in the paper.