

УДК 621.762.01

DOI 10.17513/snt.40645

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «ВТУЛКА» № СС42049 ЛЕВОЙ ОПОРЫ ШНЕКА ПОДБОРЩИКА КОРМОУБОРОЧНОГО П3000 ИЗ ПОРОШКОВОЙ СТАЛИ

Егоров М.С. ORCID ID 0000-0002-4289-1601,**Егорова Р.В. ORCID ID 0000-0002-1082-3970**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
«Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону,
Российская Федерация, e-mail: aquavdonsk@mail.ru*

Статья посвящена разработке ресурсосберегающей технологии производства ответственной детали сельскохозяйственной техники – втулки левой опоры шнека кормоуборочного комбайна П3000 методом порошковой металлургии. Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения высоких эксплуатационных характеристик детали при эффективном производственном цикле. Цель исследования – разработка и расчет параметров технологии изготовления детали «Втулка», сочетающей методы статического холодного прессования и динамического горячего прессования, для получения изделия с требуемыми размерами, плотностью и механическими свойствами. В качестве исходного материала использован отечественный диффузионно-легированный железный порошок марки ПЛ-Н2Д2М с добавлением 0,5 % графита ГК-1. Методология исследования включала проектирование технологического процесса на основе последовательного применения двух ключевых методов: статического холодного прессования для формирования пористой заготовки и последующего динамического горячего прессования для ее окончательного уплотнения. Применен аналитический метод расчета параметров пресс-форм и штампа. На основе анализа конструкции, отнесенной к 3-й группе сложности, обоснована и детально разработана схема двухстороннего прессования, обеспечивающая равномерное распределение плотности. Представлены результаты расчетов конструктивных параметров штамповой оснастки для обоих этапов: определена геометрия пуансонов, матрицы, упоров и упругих элементов для холодного прессования, а также размеры заготовки и штампа для горячего прессования. Для статического холодного прессования выбрана схема с плавающей матрицей, а пористость заготовки установлена на уровне 25 %. Приведены подробные схемы пресс-форм и штампа, иллюстрирующие положения инструмента на всех этапах процесса. Разработана комплексная технология изготовления порошковой детали «Втулка», сочетающая статическое холодное и динамическое горячее прессование. Технология позволяет получить готовое изделие с регламентированными геометрическими и физико-механическими свойствами за счет управления процессом формования и уплотнения. Использование плавающей матрицы и двухстороннего прессования повышает равномерность свойств и повторяемость процесса. Разработанная технология рекомендована для внедрения в серийное производство.

Ключевые слова: порошковая металлургия, статическое холодное прессование, динамическое горячее прессование, пресс-форма, порошковая шихта, железный порошок, втулка

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE “SLEEVE” PART NO.SS42049 OF THE LEFT SCREW SUPPORT OF THE FORAGE PICKER P3000 MADE OF POWDER STEEL

Egorov M.S. ORCID ID 0000-0002-4289-1601,**Egorova R.V. ORCID ID 0000-0002-1082-3970**

*Federal State Budgetary Educational Institution “Don State Technical University”,
Rostov-on-Don, Russian Federation, e-mail: aquavdonsk@mail.ru*

The article is devoted to the development of a resource-saving technology for manufacturing a critical part of agricultural machinery – the “Sleeve” of the left auger support of the P3000 forage harvester using powder metallurgy. The relevance of the work is due to the need to ensure high performance characteristics of the part with an efficient production cycle. The aim of the study is the development and calculation of parameters for the manufacturing technology of the “Sleeve” part, combining methods of static cold pressing and dynamic hot pressing, to obtain a product with required dimensions, density, and mechanical properties. The domestic diffusion-alloyed iron powder grade PL-N2D2M with the addition of 0.5% GK-1 graphite was used as the starting material. The research methodology included designing a technological process based on the sequential application of two key methods: static cold pressing for forming a porous billet and subsequent dynamic hot pressing for its final densification. An analytical method for calculating press-form and die parameters was applied. Based on the analysis of the design, assigned to the 3rd complexity group, a double-sided pressing scheme ensuring uniform density distribution was justified and developed in detail. The results of calculations for the structural parameters of the die tooling for both stages are presented: the geometry of punches, die, stops, and elastic elements for SCP, as well as the billet and die dimensions for dynamic hot pressing, were determined. For static cold pressing, a scheme with a floating die was chosen, and the billet porosity was set at 25%. Detailed diagrams of the press-forms and die illustrating the tool positions at all process stages are provided. A comprehensive technology for manufacturing the powder “Sleeve” part, combining static cold and dynamic hot pressing, has been developed. The technology enables obtaining a finished product with regulated geometric and physico-mechanical properties by controlling the forming and densification processes. The use of a floating die and double-sided pressing enhances the uniformity of properties and process repeatability. The developed technology is recommended for implementation in mass production.

Keywords: powder metallurgy, static cold pressing, dynamic hot pressing, mold, powder charge, iron powder, sleeve

Введение

Особо важное место обработке давлением уделяется в технологии порошковой металлургии. При этом следует четко различать две области ее использования: формование заготовок из порошковых шихт требуемого состава и повышение их плотности. В том и другом случае под действием внешнего давления происходит не только формование заготовок или готовых изделий, но и в определенной мере формирование самого порошкового материала благодаря уплотнению, возникновению связей на межчастичных контактных поверхностях и всем процессам, сопровождающим пластическую деформацию. Явления, присущие двум первым процессам, специфичны и наблюдаются только в технологии порошковой металлургии [1; 2]. Явления, присущие третьему процессу, имеют много общего с наблюдаемыми при обработке монолитных материалов. Однако существование значительной пористости определяет наличие многочисленных особенностей деформации такого материала и необходимость всестороннего изучения этого процесса [3, с. 219]. В порошковой металлургии используются практически все способы, разработанные для обработки давлением компактных материалов. Наибольшее распространение при получении заготовок деталей из металлических порошков полу-

чи прессование в закрытых пресс-формах, а полуфабрикатов в виде полос, лент, прутков – прокатка и экструзия [4].

Цель исследования – разработка и расчет параметров технологии изготовления порошковой детали «Втулка» методом статического холодного и динамического горячего прессования, обеспечивающей получение изделия с требуемыми геометрическими размерами, плотностью и механическими свойствами.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья был взят отечественный порошок марки ПЛ-Н2Д2М (ТУ 14-5402-2002) производства ПАО «Северсталь» (г. Череповец). Порошок ПЛ-Н2Д2М – это диффузионно легированный железный порошок, полученный методом отжига смеси порошков, содержащих легирующие добавки. Химический состав используемого порошка представлен в табл. 1 [5; 6].

В шихту порошкового материала вводили карандашный графит ГК-1 в количестве 0,5% по массе для получения порошковых сталей. Основные его характеристики приведены в табл. 2.

Рассмотрим технологический процесс прессования в закрытой пресс-форме порошковой шихты с целью получения детали «Втулка», чертеж которой представлен на рис. 1.

Таблица 1

Химический состав порошка марки ПЛ-Н2Д2М

Марка порошка	Содержание элементов, масс. %								
	C	O	Mo	Ni	Cu	Mn	Si	S	P
ПЛ-Н2Д2М	0,02	0,25	0,3–0,7	1,5–2,5	1,5–2	0,15	0,05	0,02	0,02

Примечание: составлена авторами на основе источника [5]

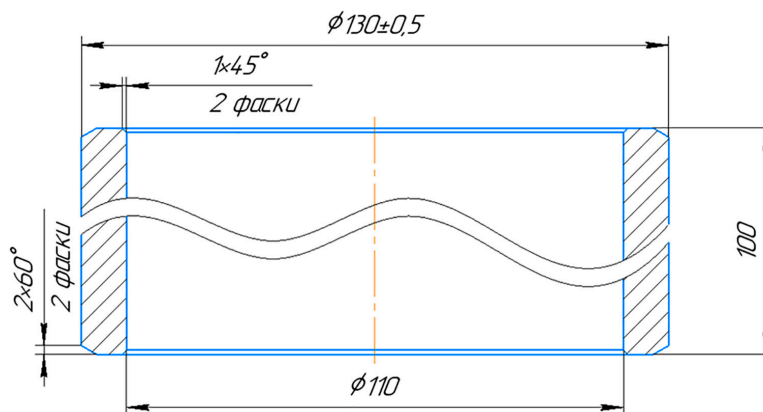


Рис. 1. Чертеж детали «Втулка»

Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Таблица 2

Характеристики карандашного графита ГК-1

Показатель	Значение
Содержание углерода, мас. %	98
Содержание золы, мас. %	≈1
Прочие летучие соединения, мас. %	≈0,5
Массовая доля влаги, мас. %	≈0,5
Размер частиц порошка, мкм	50–80

Примечание: составлена авторами на основе источника [5]

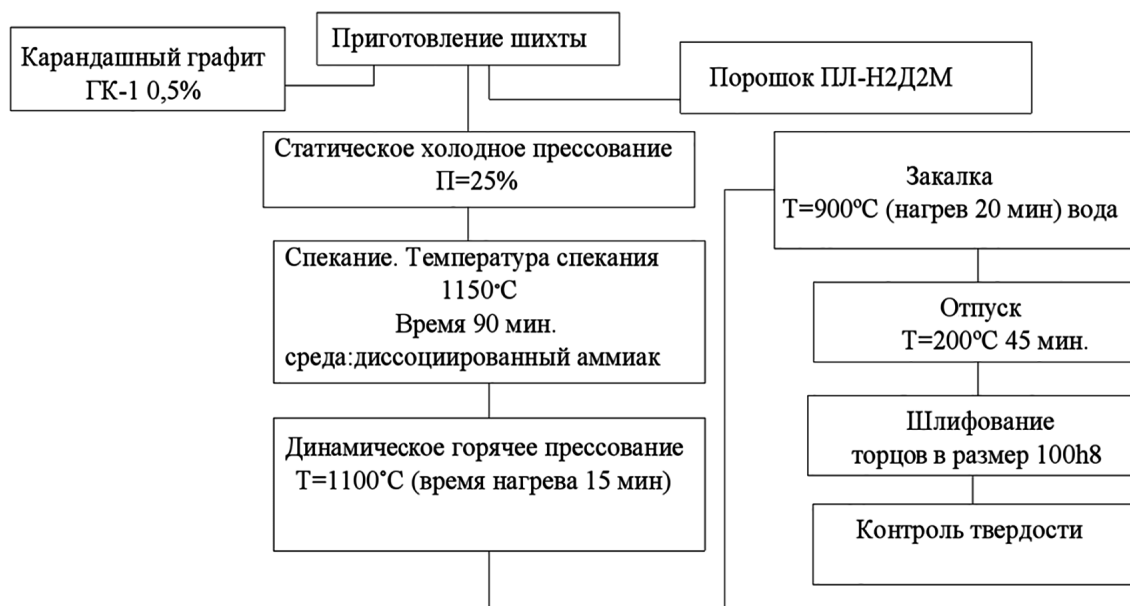


Рис. 2. Схема технологического процесса изготовления для детали «Втулка» средней опоры

Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Порошковая шихта для изготовления детали «Втулка» средней опоры шнека подборщика кормоуборочного имела следующий состав:

2% Cu + 2% Ni + 0,5% Mo + 0,5% C.

На рис. 2 показана схема технологического процесса изготовления детали «Втулка».

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ конструкции детали свидетельствует о том, что по степени сложности ее можно отнести к 3-й группе (Отношение h_k / δ составляет больше 5 при значении h_k не менее 40 мм) и подгруппе А (Сплошные (плоские) и полые детали постоянного сечения). Исходя из этого, при разработке схемы динамического горячего прессования (ДГП) необходимо учесть, что втулка представляет

собой цилиндрическую форму. Отношение высоты детали к толщине ее стенки свидетельствует о необходимости использования схемы двухстороннего прессования. На основании проделанного анализа разработана схема ДГП детали (рис. 3) [7; 8].

Разработанная схема ДГП позволяет сконструировать пористую заготовку и определить ее параметры. Наружный диаметр детали 130 мм, масса заготовки должна быть равна массе всей детали. Для повышения пластичности заготовки принимаем минимально рекомендованную ее пористость (25%), получаемую при статическом холодном прессовании в жестких стальных пресс-формах, далее ее подвергаем предварительному спеканию при $t_{сп} = 1150^\circ\text{C}$ и пористости 25% (плотность заготовки будет составлять $\rho_z = 5,8 \text{ г/см}^3$). Температуру нагрева перед ДГП принимаем $t_z = 1100^\circ\text{C}$ [9–11].

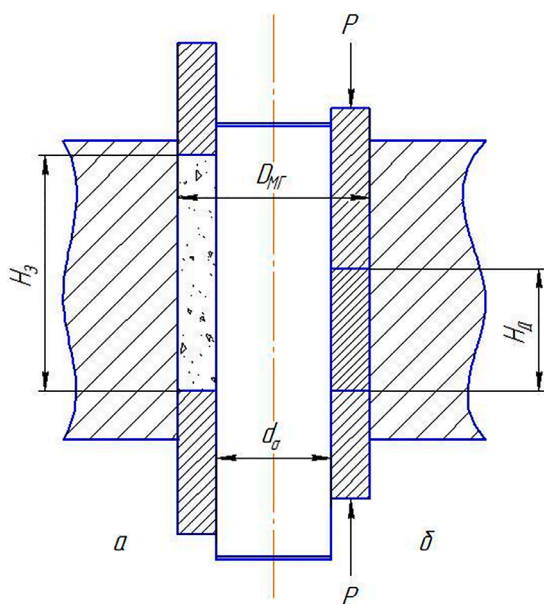


Рис. 3. Схема ДПП втулки:
а) положение перед началом ДПП;
б) положение в конце ДПП
Примечание: составлен авторами
по результатам исследования

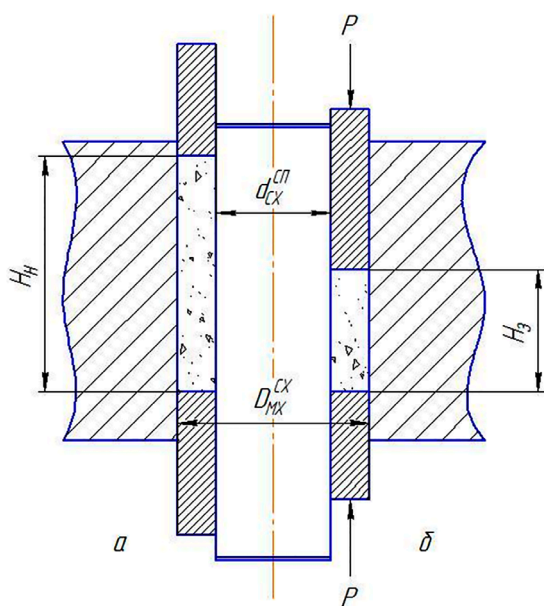


Рис. 4. Схема холодного прессования
пористой заготовки:
а) положение перед прессованием,
б) положение в конце прессования
Примечание: составлен авторами
по результатам исследования

На основании принятой конструкции заготовки разрабатываем схему статического холодного прессования. Поскольку заготовка имеет форму простой цилиндрической втулки и отношение $h_k/\delta = 10$ мм, то принимаем схе-

му двухстороннего прессования, которая изображена на рис. 4. Уплотнение порошковой шихты из насыпного состояния H_1 до требуемой высоты пористой заготовки H_3 осуществляется за счет приложения нагрузки к верхнему и нижнему пуансонам [5; 12; 13].

Технологические поперечные размеры рабочего штампового инструмента рассчитываются с учетом:

- поперечных размеров получаемой детали;
- усадки изделия после горячей допрессовки;
- рабочей температуры штампового инструмента;
- упругой деформации штампового инструмента;

Поскольку изготовление холоднопрессованных заготовок необходимо осуществлять с использованием схемы двухстороннего прессования, то пресс-форма проектируется с плавающей матрицей (рис. 5). Плавание матрицы осуществляется с помощью упругих элементов, изготовленных из технической резины. Для повышения жесткости и прочности матрицы, а также с целью экономии дорогостоящей инструментальной стали заключаем матрицу в обойму по горячей посадке [7; 14; 15]. Ограничение хода верхнего пуансона осуществляется упорами, изготовленными из конструкционных углеродистых сталей.

Перед началом эксплуатации пресс-формы происходит ее сборка в следующем порядке. На нижнюю плиту пресса устанавливается нижний упор 9, нижний пуансон 6 в сборе со стержнем 7 и упругим элементом 8. После этого матрица 3, запрессованная в обойму 4, сопрягается с внутренней рабочей полостью и нижним пуансоном 6 и устанавливается на упругий элемент 8. Пресс-форма, таким образом, подготовлена к засыпке порошковой шихты в рабочую полость матрицы. После засыпки шихты на верхний торец матрицы устанавливается верхний упор 2, а в ее рабочую полость – верхний пуансон 1. Матрица готова к работе. Прессование заготовки осуществляется следующим образом. Включается пресс, и его верхняя плита, перемещаясь вниз, давит на верхний пуансон 1, он уплотняет порошковую шихту до тех пор, пока верхняя плита пресса не коснется верхнего упора 2. При дальнейшем движении плиты пресса вниз пуансон 1, упор 2 и матрица 3 с обоймой 4 одновременно перемещаются относительно неподвижного нижнего упора 6 и стержня 7, сжимая упругий элемент 8. Таким образом, за счет «плавания матрицы» осуществляется ход нижней подпрессовки порошковой шихты. Процесс прессования

заканчивается в момент касания нижнего торца матрицы 3 и обоймы 4 нижнего упора 9. После этого на специальных подставках устанавливается матрица и с помощью стальной подставки и плиты пресса при ее движении вниз осуществляется извлечение спрессованной заготовки из полости матрицы. Диаметр подставки должен быть на 1,5–2,0 мм меньше диаметра рабочей полости матрицы. Далее цикл изготовления пористой заготовки повторяется.

Для динамического горячего прессования детали «Втулка» использована схема двухстороннего прессования [2; 5; 16]. Ограничение хода прессования верхнего пуансона осуществляется за счет использования в конструкции штампа верхнего и нижнего упоров, изготовленных из конструкционных углеродистых сталей. Для повышения прочности и жесткости матрицы помещаем ее в стальную обойму по горячей осадки (рис. 6).

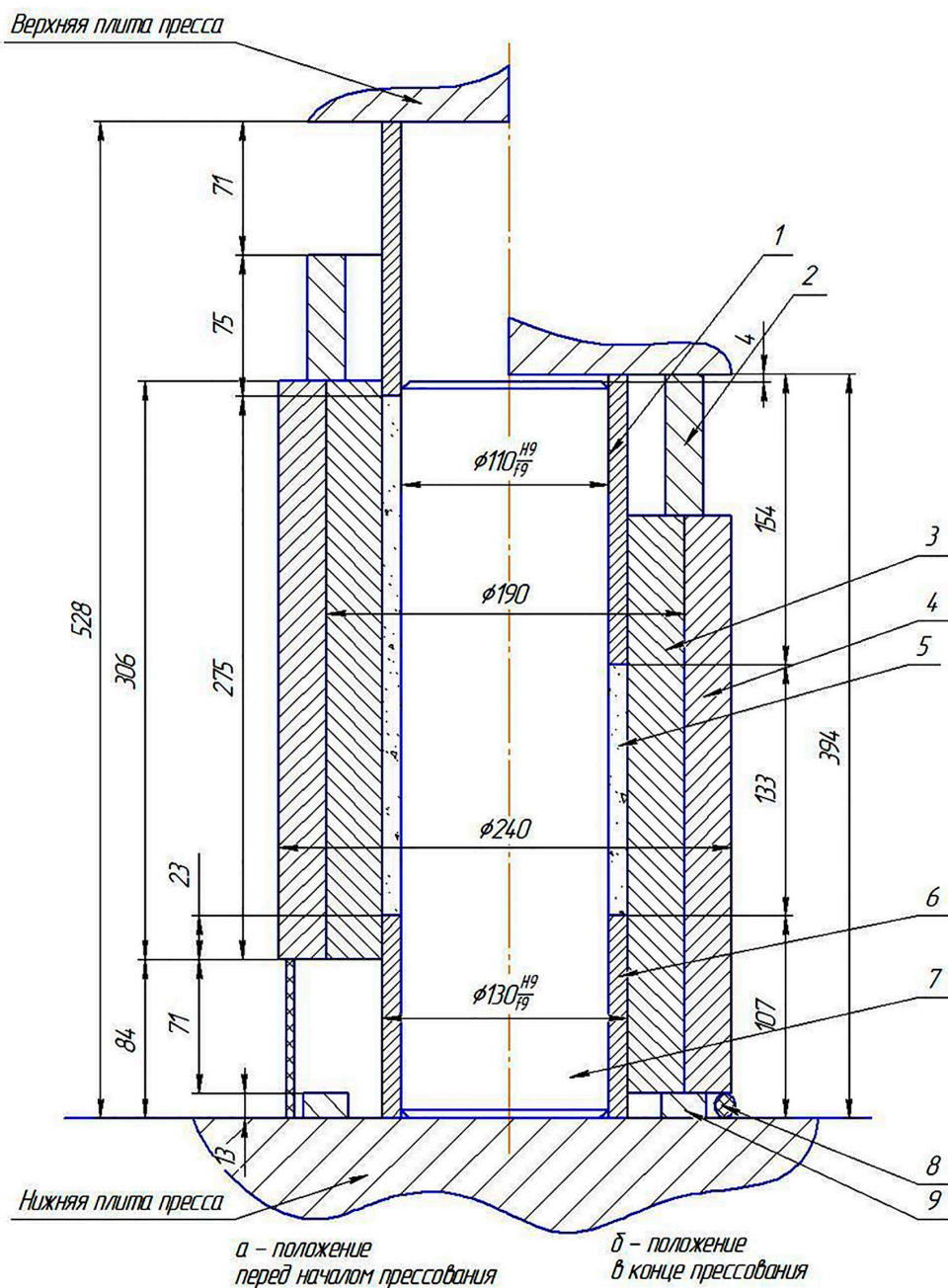


Рис. 5. Пресс-форма СХП порошковой заготовки:
а) положение перед началом прессования, б) положение в конце прессования
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

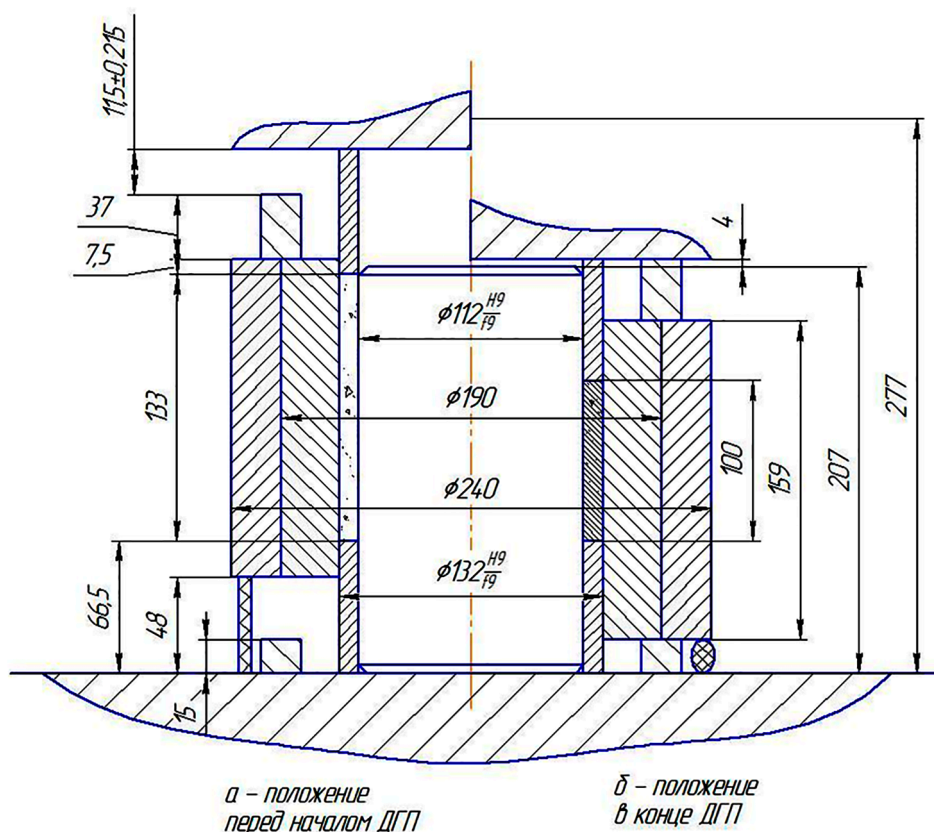


Рис. 6. Штамп ДГП: а) положение перед началом ДГП, б) положение в конце ДГП
Примечание: составлен авторами по результатам исследования

Заключение

В представленной статье разработана и детально обоснована технология изготовления порошковой детали «Втулка» для кормоуборочного комбайна ПЗ0000, сочетающая методы статического холодного прессования (СХП) и динамического горячего прессования (ДГП).

На основе анализа конструкции детали, отнесенной к 3-й группе сложности, была выбрана схема двухстороннего прессования, обеспечивающая равномерное уплотнение порошковой шихты по высоте изделия. В качестве исходного материала использован отечественный диффузионно-легированный железный порошок марки ПЛ-Н2Д2М с добавлением графита ГК-1.

Разработаны и рассчитаны ключевые параметры пресс-форм для обоих этапов:

- для СХП определена пористость заготовки (25%), ее геометрические размеры, а также конструктивные параметры пуансонов, матрицы, упоров и упругих элементов;
- для ДГП выполнены расчеты высоты заготовки, хода пуансонов и высотных размеров штампа, обеспечивающие получение

готовой детали с заданной плотностью и геометрией.

Предложенная технология позволяет эффективно управлять процессом формования и уплотнения, минимизировать дефекты и обеспечить высокие эксплуатационные характеристики изделия. Использование плавающей матрицы и упругих элементов в конструкции пресс-формы повышает надежность и повторяемость процесса.

Список литературы

1. Витязь П.А., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Состояние и перспективы развития порошковой металлургии в России, Украине и Беларуси // Доклады 12-го Международного симпозиума «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (г. Минск, 07–09 апреля 2021 г.). Минск: Белорусская наука, 2021. С. 26–80. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=yfnvef> (дата обращения: 06.09.2025).
2. Дорофеев Ю.Г. Становление, формирование и перспективы развития Новочеркасской научной школы в области изучения функциональных порошковых материалов // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 1. С. 50–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11670813> (дата обращения: 06.09.2025).
3. Ильющенко Т.А., Севастьянов Е.С., Киреев П.Н. Высокоплотные порошковые стали и технологии изготовления

из них конструкционных деталей сложной формы // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы: сб. науч. тр. Минск, 2010. 632 с. URL: <https://www.science.by/upload/iblock/810/81070752d299e4ddeda2f5f963c45427.pdf> (дата обращения: 06.09.2025).

4. Dorofeev V.Y., Sviridova A.N., Berezhnoy Y.M., Bessarabov E.N., Kochkarova K.S., Pustovoy V.N., Sviridova S.V. Structure and properties of hot-deformed powder steels microalloyed by aluminium. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. P. 022045. URL: https://www.researchgate.net/publication/341710862_Structure_and_properties_of_hot-deformed_powder_steels_microalloyed_by_aluminium (дата обращения: 16.09.2025). DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022045.

5. Егоров М.С. Научно-технологические принципы межчастичного срачивания спеченных и горячедеформированных порошковых сталей, модифицированных ультрадисперсными частицами // Материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конференции «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (г. Минск, 22–24 мая 2024 г.). Минск: Белорусская наука, 2024. С. 63–67. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68510053> (дата обращения: 04.11.2025).

6. Erden M.A., Yaşar N., Korkmaz M.E., Ayvaci B., Nimel Sworna Ross K., Mozammel M. Investigation of microstructure, mechanical and machinability properties of Mo-added steel produced by powder metallurgy method // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 114. P. 2811–2827. URL: https://www.researchgate.net/publication/350893675_Investigation_of_microstructure_mechanical_and_machinability_properties_of_Mo-added_steel_produced_by_powder_metalurgy_method (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.1007/s00170-021-07052-z.

7. Ereemeeva Z.V., Ter-Vaganyants Y.S., Sharipzyanova G.K. et al. Investigation of Sintering Process of Powder Steel SP60KhN4D2M with Various Plasticizers and Alloying Additives in Original Charge // Inorg. Mater. Appl. 2023. Res. 14. 1094–1101. URL: https://www.researchgate.net/publication/377353338_Investigation_of_Sintering_Process_of_Powder_Steel_SP60KhN4D2M_with_Various_Plasticizers_and_Alloying_Additives_in_Original_Charge. (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.1134/S2075113323040123.

8. Türkmen M., Karabulut H., Erden M.A., Gündüz S. Effect of TiN addition on the microstructure and mechanical properties of Pm steels // Technological Applied Sciences. 2017. Vol. 12. P. 78–184. URL: https://www.researchgate.net/publication/320697358_EFFECT_OF_TiN_ADDITION_ON_THE_MICROSTRUCTURE_AND_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_PM_STEELS (дата обращения: 30.09.2025). DOI: 10.12739/nwsa.2017.12.4.2a0125.

9. Özdemirler D., Gündüz S., Erden M. Influence of NbC addition on the sintering behaviour of medium carbon PM steels // Metals. 2017. Vol. 7 (4). P. 121. DOI: 10.3390/met7040121.

10. Rathore S.S., Salve M.M., Dabhade V.V. Effect of molybdenum addition on the mechanical properties of sinter-forged Fe–Cu–C alloys // Journal of Alloys Compounds. 2015. Vol. 649. P. 988–995. URL: https://www.researchgate.net/publication/282634726_Effect_of_Molybdenum_Addition_on_the_Mechanical_Properties_of_Sinter-forged_Fe-Cu-C_Alloys (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.07.156.

11. Kulkarni H., Dabhade V.V. Green machining of powder-metallurgy-steels (PMS): an overview // Journal of Manufacturing Process. 2019. Vol. 44. P. 1–18. URL: https://www.researchgate.net/publication/345450034_Green_machining_of_powder-metallurgy-steels_PMS_An_overview (дата обращения: 09.09.2025). DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.05.009.

12. Egorov M.S., Egorova R.V., Meskhi B.Ch., Egorov S.N. Development of the contact surface during sintering of powder steels // Metallurgist. 2023. Vol. 66. P. 1263–1272. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11015-023-01440-4> (дата обращения: 06.10.2025).

13. Hellenbrand G., Mevissen D., Brimmers J., Brecher C. Stressability of PM-Gears under Consideration of Local Porosity // J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy. 2025. Vol. 7. P. 1195–1202. URL: https://www.researchgate.net/publication/389877046_Stressability_of_PM-Gears_under_Consideration_of_Local_Porosity (дата обращения: 06.10.2025). DOI: 10.2497/jjspm.16C-T11-03.

14. Egorov M.S., Egorova R.V., Kovtun M.V. Influence of carbon content on the formation of a contact interparticle surface during hot post-pressing // Safety of Technogenic and Natural Systems. 2023. Vol. 7 (2). P. 90–101. URL: https://www.researchgate.net/publication/371391080_Influence_of_Carbon_Content_on_the_Formation_of_a_Contact_Interparticle_Surface_during_Hot_Post-Pressing (дата обращения: 06.10.2025). DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-90-101.

15. Дьячкова Л.Н. Порошковые материалы на основе железа с повышенными механическими и триботехническими свойствами: монография. Минск: Белорусская наука, 2020. 204 с. URL: <https://library.bntu.by/wp-content/uploads/2024/01/sod-96.pdf?ysclid=mj7htr0xhl728878711> (дата обращения: 04.11.2025).

16. Hojati M., Gierl-Mayer C., Danninger H. Impact Fracture Behaviour of Powder Metallurgy Steels Sintered at Different Temperatures // Berg Huetttenmaenn Monatsh. 2024. Vol. 169. P. 132–139. URL: https://www.researchgate.net/publication/377624188_Impact_Fracture_Behaviour_of_Powder_Metallurgy_Steels_Sintered_at_Different_TemperaturesEinfluss_der_Sintertemperatur_auf_das_Schlagbruchverhalten_von_pulvermetallurgischen_Stahlen (дата обращения: 04.11.2025). DOI: 10.1007/s00501-024-01428-w.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.