



## Пути возможного улучшения обрабатываемости высокоплотных порошковых сталей

*В.Г. Шишка, Ю.М.Бережной, Н.В. Шишка*

*Акционерное общество «Особое конструкторско-технологическое бюро «Орион»*

**Аннотация:** Высокоплотные порошковые стали, полученные с применением технологии горячей штамповки пористых заготовок значительно уступают по показателям обрабатываемости резанием аналогичным по химическому составу литым и горячекатаным сталям. В статье рассматриваются пути возможного улучшения обрабатываемости конструкционных порошковых сталей.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, горячая штамповка пористых заготовок, ГШПЗ, обрабатываемость резанием.

Использование технологий порошковой металлургии находит широкое применение, как в машиностроении, так и в других отраслях [1-4]. Однако высокоплотные порошковые конструкционные стали, полученные с применением технологии горячей штамповки пористых заготовок (ГШПЗ), при их высоких механических свойствах значительно уступают по показателям обрабатываемости резанием аналогичным по химическому составу литым и горячекатаным сталям [5-14].

Рассмотрим возможные пути улучшения обрабатываемости резанием порошковых сталей. Одним из таких путей является применение специальной термической обработки. Проведенные авторами исследования показывают, что высокотемпературный диффузионный отжиг положительно сказывается на структуре материала. После его проведения наблюдается коагуляция и сфероидизация пор и неметаллических включений, некоторый рост размеров зерен, образование мелкодисперсного пластинчатого перлита, уменьшение внутренних напряжений, как первого, так и второго рода, снижение плотности дислокаций. Изменяются также и физико-механические свойства материала, а именно, уменьшается твердость и незначительно увеличивается теплопроводность. Такой комплекс свойств улучшает

---

обрабатываемость резанием. В частности, возрастает скорость резания и снижается как абразивная, так и диффузионная составляющая износа инструмента, улучшается, хотя и незначительно, качество обработанной поверхности. В целом, показатели обрабатываемости возрастают примерно в 1,5-1,8 раза. Однако, учитывая высокую энергоемкость процесса отжига, результат нельзя считать достаточно эффективным.

Более значительных результатов следует ожидать при применении целенаправленного легирования порошковых материалов, о чем свидетельствует опыт разработки состава и технологии получения литых и горячекатаных сталей улучшенной обрабатываемости резанием. Это направление в порошковой металлургии привлекательно также тем, что позволяет вводить различные комплексы легирующих элементов в любых пропорциях без каких-либо ограничений, характерных для технологии литейного производства. Таким образом, открывается возможность получения сталей с высокими показателями обрабатываемости без ухудшения других эксплуатационных свойств.

В области порошковой металлургии работ на эту тему явно недостаточно. Поэтому, несомненно, полезным будет анализ влияния различных химических элементов и их сочетаний на структуру, физико-механические свойства и обрабатываемость резанием не только порошковых, но и литых сталей и сплавов на основе железа [15-21].

Введение серы является общеизвестным способом повышения обрабатываемости резанием. При этом образуются сернистые соединения железа, марганца, титана и других элементов в виде их сложных сульфидов и оксисульфидов. Характер образующихся сульфидных включений во многом зависит от соотношения количества вводимой серы и содержания кремния, марганца и кислорода. Определяющее влияние на физико-

---

механические свойства стали и ее обрабатываемость резанием оказывают такие факторы, как объем частиц сульфидной фазы, ее состав, морфология, степень дисперсности и характер распределения. Наличие в структуре равномерно распределенных, мелкодисперсных сернистых включений округлой формы при общем содержании серы до 0.3 % (по массе) снижает прочностные свойства, пластичность, вязкость и контактную выносливость. При этом повышается порог хладноломкости, появляется охрупчивающий эффект при повышенных температурах, а в случае образования текстуры растет анизотропия свойств. Это в значительной мере ограничивает применение сернистых сталей при производстве ответственных конструкционных изделий. Введение вместо серы селена и теллура, химических элементов той же группы что и сера, несмотря на некоторое увеличение затрат, в ряде случаев более предпочтительно. В отличие от сульфидов, отрицательное влияние селенидов и теллуридов на прочностные свойства материала менее значительно. Одновременное легирование в различном сочетании серой, селеном и теллуrom еще в большей степени сглаживает вышеуказанные негативные последствия, хотя полностью и не устраняет их.

Для производства специальных конструкционных и автоматных сталей широкое применение нашли легкоплавкие металлы, не растворяющиеся в железной основе, такие как свинец и висмут. Свинец, как наиболее доступный и дешевый, получил наибольшее распространение. Основная проблема при производстве свинецсодержащих сталей заключается в обеспечении требуемой дисперсности и равномерности распределения свинца. Максимальное его количество составляет около 0,3 % (по массе) и ограничивается растворимостью в жидком железе. В классической металлургии свинец вводят в сталь при ее разливке, а в процессе охлаждения он выделяется в виде отдельных включений. Свинец практически не

---



оказывает влияния на прочность и пластичность углеродистых сталей при нормальных температурах эксплуатации, но в процессе резания, в зонах первичной и вторичной деформации, под действием высоких температур он выделяется в виде жидкой фазы, повышая тем самым эффективность процесса стружкообразования. При этом значительно улучшаются практически все показатели обрабатываемости сталей этого класса. Свинец можно было бы считать весьма перспективным легирующим элементом, однако, неизбежные экологические проблемы, возникающие в процессе легирования, сдерживают его применение.

Улучшение обрабатываемости может достигаться также за счет введения щелочных и щелочноземельных металлов, которые, имея весьма ограниченную растворимость в железной основе и высокое химическое сродство к кислороду и сере, воздействуют, прежде всего, на состав и морфологию неметаллических включений. Из-за трудности введения этих элементов, на сегодняшний день широко применяется лишь легирование кальцием. Наряду с повышением обрабатываемости этот элемент во многих случаях улучшает прочность, хладноломкость и ударную вязкость стали, снижает охрупчивающее влияние примесной серы. Кальций вводят в сталь в процессе раскисления в виде силикокальция. При этом наблюдается обволакивание сульфидами и оксидами кальция и марганца твердых неметаллических включений, в частности, оксидов алюминия. Происходит общая глобулизация неметаллических включений, которые приобретают сложный оксихалькогенный состав, что снижает абразивное воздействие на режущий инструмент. Таким образом, легирование кальцием позволяет наряду с улучшением обрабатываемости не только не ухудшить, а даже в некоторой степени улучшить физико-механические свойства сталей. Это делает кальций очень привлекательным легирующим элементом, поэтому

---

рассмотрим особенности структуры и свойств кальцийсодержащих сталей более подробно.

Термодинамической предпосылкой применения кальция в производстве стали является его высокая химическое сродство к электроотрицательным элементам VI группы периодической системы - сере и кислороду. Однако, низкая температура плавления ( $500^{\circ}\text{C}$ ), кипение ( $1440^{\circ}\text{C}$ ) и незначительная растворимость в жидком железе (0,016% - 0,065% при  $1600^{\circ}\text{C}$ ) затрудняют использование кальция в чистом виде.

В зависимости от содержания кальция различают стали двух типов.

Первый тип - с содержанием кальция до 0,002-0,003 % (по массе). Для структуры стали этой группы характерны весьма пластичные, вытянутые, преимущественно однофазные, иногда двухфазные включения. Двухфазные оксиды состоят из кристаллов, распределенных в аморфной матрице. По химическому составу включения соответствуют анортину ( $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ ) и сульфиду марганца.

Второй тип - с содержанием кальция выше 0.002-0.003 % (по массе). Кальцийсодержащие включения в них глобулярные, недеформируемые, окруженные более или менее сплошной оболочкой сульфидов, и по химическому составу соответствуют гелениту ( $2\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ) и двойному сульфиду марганца и кальция.

Обрабатываемость сталей первого типа улучшается в 1.5 раза при резании быстрорежущим инструментом и в 5 раз при обработке твердосплавным. Для сталей второй группы эти цифры составляют соответственно 1,2 и 5.

Механизм улучшения обрабатываемости при легировании кальцием носит комплексный характер. На основании анализа различных публикаций по этому вопросу можно сделать вывод о преобладающем влиянии на обрабатываемость резанием различных кальцийсодержащих соединений при

---

температурах, характерных для зоны резания. Так твердость анартита, геленита и оксида алюминия при 20°C составляет HV - 500, 600 и 2100 соответственно, при 600°C - 400, 600 и 1000, при 800°C - 390, 410 и 800, а при температуре около 1000°C - твердость всех вышеперечисленных включений составляет приблизительно 400 HV [15-19]. Приведенный характер зависимостей позволяет объяснить причины повышения стойкости инструмента при обработке кальцийсодержащих сталей, в которых твердые абразивные включения, такие как оксид алюминия, модифицируются соединениями кальция в менее твердые включения.

Помимо этого, соединения кальция при температуре в зоне резания 900-1000°C приобретают пластические свойства и образуют на инструментах из твердых сплавов защитные антифрикционные покрытия в виде тонкой пленки. Подобные пленки наблюдаются и на быстрорежущем инструменте при обработке сталей первого типа, так как при температурах резания в пределах 400-600°C кальцийсодержащие соединения в материалах этого типа достаточно пластичны. В сталях второго типа кальцийсодержащие соединения представлены хрупкими включениями и защитных пленок не образуют.

Помимо вышеперечисленных химических элементов для улучшения обрабатываемости сталей резанием применяют также фосфор и азот.

Фосфор прежде всего улучшает показатели шероховатости обрабатываемой поверхности. Его содержание в легкообрабатываемых сталях составляет 0,05-0,15 % (по массе). Растворимость этого элемента в железе при температуре ниже 200°C составляет 0,02-0,03 % (по массе), а повышение его содержания приводит к образованию пересыщенного твердого раствора. Следует учитывать, что фосфор в железе распределяется неравномерно и сегрегирует на границы зерен. Фосфор повышает

---

температуру полиморфного превращения железа до 1050°C, при этом образуется эвтектика Fe-Fe<sub>3</sub>P (содержание фосфора 9,85 % (по массе)). У катанных и литых сталей фосфор снижает пластичность и ударную вязкость и повышает предел прочности, твердость, текучесть и ковкость.

При легировании азотом происходят аналогичные явления, однако, при этом не исключается возможность образования высокотвердых нитридов, которые обуславливают увеличение абразивного износа инструмента. Данное обстоятельство сдерживает широкое использование азота в качестве легирующего элемента для повышения обрабатываемости резанием конструкционных сталей. Общеизвестным считается целесообразность введения фосфора и азота в стали с низким содержанием углерода и предназначенных для изготовления ответственных конструкционных изделий.

На основании обзора различных методов улучшения обрабатываемости литых и горячекатаных сталей можно сделать вывод, что обрабатываемость порошковых сталей можно осуществить за счет введения в материал элементов, образующих включения не взаимодействующие с железной основой, а также за счет изменения химического состава, как неметаллических включений, так и самой железной основы.

Технологические возможности процесса получения порошковых изделий позволяют расширить диапазон вводимых лигатур. В частности, с целью улучшения обрабатываемости резанием вводятся сульфиды железа, меди, молибдена, марганца, а также мелкодисперсные аморфные порошки селена, теллура и серы. За счет использования атмосферы сернистого водорода разработаны оригинальные методы насыщения материала халькогенными соединениями [16].

Получение кальцийсодержащих порошковых сталей связано с использованием железных порошков с повышенным содержанием кальция,

---

либо с введением кальция в виде самостоятельных соединений, например, карбоната кальция или оксида кальция [17,18].

Легирование свинцом и висмутом порошковых сталей только для улучшения обрабатываемости резанием весьма ограничено, в то же время широко используется их введение в порошковые материалы на основе железа в сочетании с оловом, цинком, медью, кадмием и другими элементами с целью создания антифрикционных сплавов для работы в условиях сухого трения [19,20].

Краткий обзор по тематике исследований показывает, что количество работ, посвященных улучшению обрабатываемости резанием конструкционных порошковых сталей металлургическими методами, явно недостаточно. Объясняется это, по-видимому, тем, что получение изделий методами порошковой металлургии было ориентировано на полное отсутствие, либо весьма незначительный объем механической обработки. Из приведенного обзора следует, что авторам публикаций так и не удалось создать конструкционные порошковые стали, обладающие требуемым комплексом свойств, а именно: высокой прочностью, пластичностью и обрабатываемостью резанием. Причина этого, на наш взгляд, кроется в том, что технологические возможности порошковой металлургии не были использованы в полной мере. Следовательно, необходим дальнейший научный поиск в этом направлении.

### Литература

1. Федосеева М.А. Горячедеформированный порошковый материал, легированный ферротитаном, на основе МХА стружки Д16, его структура и свойства // Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602).



2. Рудская А.Г., Власенко М.П., Чаговец С.В. и др. Методы синтеза  $\text{LaMnO}_3$  (обзор) // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602.

3. Sinter Brazing of Ferrous Parts with Disappearing Joint/ H. Danninger, J.M. Garmendia Gutierrez, R.Ratzi, and all.// Proceedings of PM2010 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition. Florence, 10-14 October 2010, Vol.2, pp.385-392.

4. Schatt W., Wieters K.-P. and all. Powder Metallurgy: Processing and Materials. – EPMA, 1997. – 492 p.

5. Витязь П.А., Шелег В.К., Ильющенко А.Ф., Савич В.В. Порошковая металлургия: современное состояние и перспективы// Порошковая металлургия. 2004. - №27. – С.5-29.

6. Порошковая металлургия в СССР: История. Современное состояние. Перспективы. - М.: Наука, 1986. - 294с.

7. Радомысельский И.Д. Порошковые конструкционные детали. Современное состояние, перспективы развития// Порошковая металлургия. - 1985. - № 10.- С. 37 - 41.

8. Федорченко И.М. Важнейшие тенденции развития порошковой металлургии// Порошковая металлургия. - 1986.- № 6-С. 1 - 11.

9. Кулик О.П., Денисенко Э.Т. Современное состояние и тенденции развития порошковой металлургии за рубежом// Порошковая металлургия. - 1986. - № 1-С. 98 - 105.

10. Арзамазцева Э.А. Некоторые достижения порошковой металлургии// Автомобильная промышленность США. - 1988. - № 5.-С. 32 - 39.

11. Анцифиров В.Н., Бобров Г.В., Дружинина Л.К. и др. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. М.: Металлургия, 1987. - 792 с.



12. Манохин А.И., Шоршоров М.Х. Развитие порошковой металлургии. - М.: Наука, 1988. - 77 с.

13. Дорофеев Ю.Г., Мариненко Л.Г., Устименко В.И. Конструкционные порошковые материалы и изделия. - М.: Металлургия, 1986. - 496 с.

14. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. - М.: Металлургия, 1977. - 216 с.

15. Скориков А.В. Теоретические предпосылки обеспечения заданного качества порошковых изделий и рекомендации по их практической реализации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Новочеркасск. - 2003 - 32 с.

16. Сата Т., Мурата Р., Аксаева Т. Обзор исследований и разработок в области обрабатываемости стали в Японии: Материалы междунар. симпоз. "О влиянии металлургии на обрабатываемость сталей". - Токио. - 1977. - С.357-379.

17. Шидловская С.И. Микролегирование порошковых материалов на основе железа щелочными и щелочно-земельными металлами// Порошковая металлургия. - Минск: Вышэйш. шк., 1990. - Вып. 2

18. Заявка 58 - 6962, МКИ С 38/14, С22 С 33/02. Порошковая автоматная сталь. / Като Тэцуе и др. (Япония). - № 58 - 104215; Заявл. 02.07.81 г.; Оpubл. 14.01.83 г.

19. Кольцов В.П., Берент В.Я., Поштала А.С., Семенов М.Е. Пропитка контактных пластин из спеченного материала легкоплавкими сплавами. //Порошковая металлургия. - 1975. - № 7.-С. 93 - 98.

20. Порошковая металлургия материалов специального назначения. /Под. ред. Дж.Барка, В.Бейса. - М.: Металлургия, 1977- 376 с.

21. Дорофеев В.Ю., Скориков А.В., Шишка В.Г. Влияние карбида кальция на обрабатываемость резанием горячедеформированных



порошковых сталей Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 1994. № 1-2. С. 9.

### References

1. Fedoseeva M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602).
  2. Rudskaja A.G., Vlasenko M.P., Chagovec S.V. and all. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3602).
  3. Sinter Brazing of Ferrous Parts with Disappearing Joint. H.Danninger, J.M.Garmendia Gutierrez, R.Ratzi, and all. Proceedings of PM2010 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition. Florence, 10-14 October 2010, Vol.2, pp.385-392.
  4. Schatt W., Wieters K.-P. and all. Powder Metallurgy: Processing and Materials. EPMA, 1997.492 p.
  5. Vitjaz' P.A., Sheleg V.K., Il'jushhenko A.F., Savich V.V. Poroshkovajametallurgija. 2004. №27. pp.5-29.
  6. Poroshkovaja metallurgija v SSSR: Istorija. Sovremennoe sostojanie. Perspektivy. [Powder metallurgy in the USSR: History. Current status. Prospects.] M.: Nauka, 1986. 294 p.
  7. Radomysel'skij I.D. Poroshkovaja metallurgija. 1985. № 10. pp. 37 - 41.
  8. Fedorchenko I.M. Poroshkovaja metallurgija. 1986. № 6. pp. 1 - 11.
  9. Kulik O.P., Denisenko Je.T. Poroshkovaja metallurgija. 1986. № 1-pp. 98 - 105.
  10. Arzamazceva Je.A. Avtomobil'naja promyshlennost' SShA. 1988. № 5.pp. 32 - 39.
  11. Ancifirov V.N., Bobrov G.V., Druzhinina L.K. and all. Poroshkovaja metallurgija I napylennye pokrytija.[Powder metallurgy and spray coatings.] M.: Metallurgija, 1987. 792 p.
-



12. Manohin A.I., Shorshorov M.H. Razvitie poroshkovej metallurgii. [Development of powder metallurgy.] M.: Nauka, 1988. 77 p.

13. Dorofeev Ju.G., Marinenko L.G., Ustimenko V.I. Konstrukcionnye poroshkovye materialy i izdelija. [Constructional powder materials and products.] - M.: Metallurgija, 1986. 496 p.

14. Dorofeev Ju.G. Dinamicheskoe gorjachee pressovanie poristyh poroshkovyh zagotovok. [Dynamic hot pressing of porous powder blanks.] M.: Metallurgija, 1977. 216 p.

15. Skorikov A.V. Teoreticheskie predposylki obespechenija zadannogo kachestva poroshkovyh izdelij i rekomendacii po ih prakticheskoj realizacii. [Theoretical prerequisites for ensuring the specified quality of powder products and recommendations for their practical implementation.] Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doctora tehniceskikh nauk. Novocherkassk. 2003. 32 p.

16. Sata T., Murata R., Akxaeva T. Obzor issledovanij i razrobotok v oblasti obrabatyvaemosti stali v Japonii: Materialy mezhdunar. simpoz. "O vlijanii metallurgii na obrabatyvaemost' stalej". Tokio. 1977.pp.357-379.

17. Shidlovskaja S.I. Poroshkovaja metallurgija. Minsk: Vyshnejsh. shk., 1990. Vyp.2 pp. 65-69.

18. Zajavka 58 - 6962, MKI S 38/14, S22 S 33/02. Poroshkovaja avtomatnaja stal'. Kato Tjecutei dr. (Jap). № 58 - 104215; Zajavl.02.07.81 g.; Opubl.14.01.83.

19. Kol'cov V.P., Berent V.Ja., Poshtala A.S., Semenov M.E. Poroshkovaja metallurgija. 1975. № 7.pp. 93 - 98.

20. Poroshkovaja metallurgija materialov special'nogo naznachenija. [Powder metallurgy of special purpose materials] Pod. red. Dzh.Barka, V.Bejsa. M.: Metallurgija, 1977. 376 p.

---



21. Dorofeev V. Ju., Skorikov A. V., Shishka V. G. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki. 1994. № 1-2. pp. 9.