

Исследование прочности заготовок деталей, формованных из железного порошка

С. Н. Григорьев, А. М. Дмитриев, Н. В. Коробова

Рассмотрены высокоэффективные схемы формования порошковых заготовок, предусматривающие интенсивные сдвиги между частицами формуемого порошка. Для оценки качества формованных заготовок на этапе, предшествующем дорогостоящему спеканию заготовок, предложен метод испытания заготовок на срез в разработанном несложном устройстве. Построена зависимость напряжения среза заготовки от схемы ее деформирования при формовании, воздействия магнитно-импульсной обработки и состава порошковой шихты.

Ключевые слова: порошковые композиции на железной основе, формование холодное, испытание на срез в штампах, математическая модель напряжения среза.

Введение

При производстве деталей из железных порошков применяют разные технологические процессы [1–5]: формование на прессах из порошковой шихты заготовок простейшей формы, их спекание в защитной атмосфере и последующее деформирование в процессах холодной и горячей объемной штамповки, а также формование на прессах из порошковой шихты непосредственно порошковых деталей и их спекание в защитной атмосфере.

При применении обоих технологических процессов имеет место проблема недостаточно высокой плотности как формованных заготовок простейшей формы (первый процесс), так и формованных непосредственно порошковых деталей (второй процесс).

Цель работы — изучение причин недостаточно высокой плотности формованных заготовок (деталей) и возможностей их преодоления, предложение способов оценки качества формуемых заготовок.

Механизм формоизменения

При уплотнении засыпанного порошка марок ПЖВ2.160.28, ПЖВ4.160.28, ПЖРВ2.200.26, ПЖРВ3.200.26, в закрытой матрице (рис. 1) прикладываемая удельная сила (давление) p составляет 600–800 МПа.

При пластической деформации как компактных, так и пористых материалов, одним из основных

является сдвиговый механизм формоизменения [5, 6]. При деформации пористых материалов этот механизм формоизменения играет особую роль [7], которая заключается в следующем.

Если удельная сила меньше 600 МПа или больше 800 МПа, то после уплотнения порошка цельной заготовки порошковой детали не получается. При указанных давлениях уплотнения порошковая деталь имеет остаточную пористость 15–18%. Последующее спекание формованной заготовки практически не изменяет ее остаточной пористости. Детали с такой

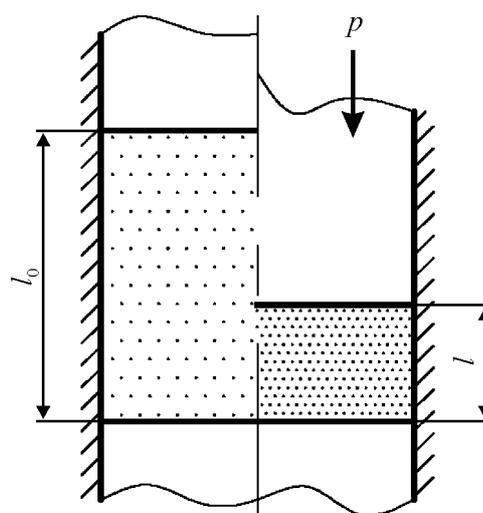


Рис. 1. Схема уплотнения засыпанного порошка в закрытой матрице.

остаточной пористостью не получают комплекс механических характеристик, включающий в себя высокие прочность и пластичность.

Причина разрушения порошковой заготовки при давлениях свыше 800 МПа показана на рис. 2а. Образующиеся макропоры оказывают сопротивление уплотнению. Они, как все арочные конструкции, очень устойчивы к действию сжимающих напряжений p . Раньше, чем эти поры закроются, под действием p на поверхности пор зарождаются трещины, показанные на рисунке штриховой линией, и заготовка разрушается при дальнейшем ее сжатии давлением свыше 800 МПа.

При такой остаточной пористости никакие легирующие добавки практически не оказывают влияния на качество детали. Эффект легирования проявляется при пористости < 10%.

Для получения высокоплотных деталей непосредственно из порошковой шихты необходимо осуществлять деформирование в условиях, при которых в заготовке происходят интенсивные сдвиги между частицами (рис. 2б).

Если кроме давления p приложить сдвигающее напряжение τ , пора легко закроется, и перепрессовочных трещин не будет.

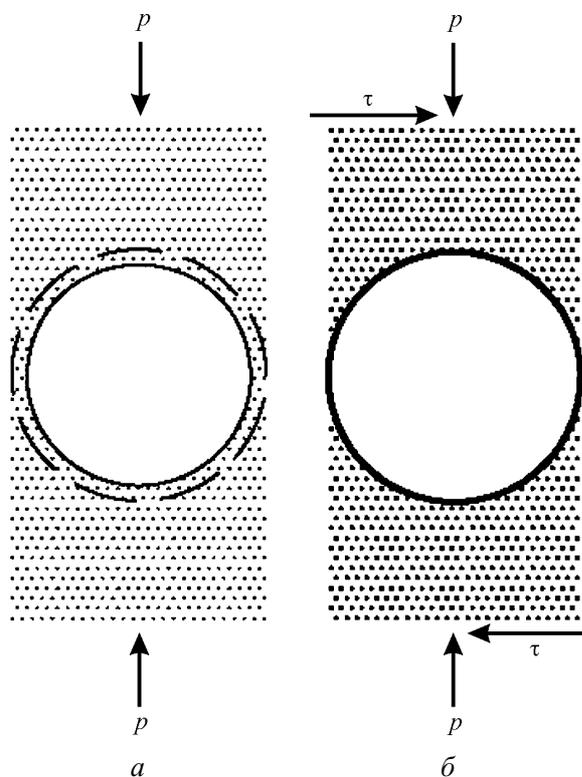


Рис. 2. Схемы: а — образование микротрещин в порошковой заготовке вокруг сферической поры, б — закрытие поры при приложении к заготовке сдвигающих напряжений.

Наиболее надежно чистую поверхность частиц можно получить при их сближении благодаря растяжению поверхности контакта. Хрупкие пленки при растяжении поверхности частиц лопаются, и в трещины выходят свежие неокисленные объемы металла, которые и участвуют в диффузии.

Метод дает возможность повышения легирования сталей, изготовления деталей из любых композиций, при этом удельная сила на инструменте не превышает 1000 МПа ($q \leq 1000$ МПа).

В настоящее время обработка давлением все более тесно сближается с материаловедением. Обработка давлением [8 – 10] решает те проблемы изменения механических характеристик материалов, которые невозможно было решить с помощью традиционных специализаций материаловедения. Особенно это проявляется при производстве деталей из металлических порошков. Ранее мало уделяли внимания формованию деталей из металлического порошка как методу изменения свойств материала, в отличие от легирования их порошковыми добавками различного химсостава и дисперсности, спекания порошковых композиций в детали, обладающие некоторой прочностью, а также термообработки изготовленных деталей. Формование осуществляли

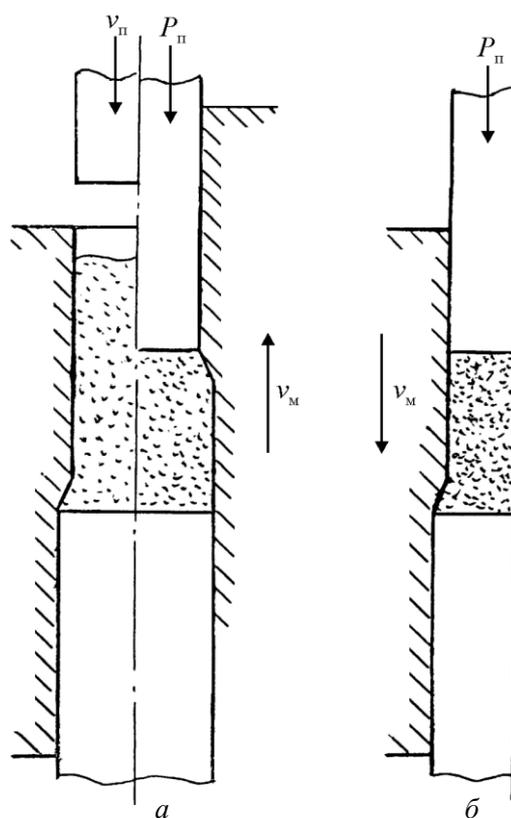


Рис. 3. Схема формования порошковой заготовки осевым сжатием с созданием сдвигов слоев материала

по схеме, приведенной на рис. 1, что имело указанные выше недостатки.

Формование высокоплотных деталей со сдвигом частиц можно проводить на изготовленных по чертежам авторов данной статьи прессах для выдавливания с активными силами контактного трения, конструкция которых представлена в [7].

Формование осевым сжатием с одновременным созданием в заготовке сдвигов слоев материала осуществляли на этих прессах по схеме, приведенной на рис. 3.

На первом этапе (рис. 3а) при движении матрицы вверх со скоростью v_m , между торцами ступени на матрице и ступени на заготовке образуется кольцевая полость, в которую происходит радиальное выдавливание материала заготовки. Это выдавливание осуществляется силой $P_{\text{п}}$, действующей через пуансон на верхний торец заготовки. Вследствие радиального течения выдавливаемого материала заготовки, на уровне ступени матрицы происходят сдвиги слоев материала, способствующие закрытию пор. Поскольку ступень матрицы при ее движении перемещается вдоль всей высоты заготовки, поры закрываются во всем объеме уплотняемого материала.

На втором этапе (рис. 3б) при движении матрицы вниз осуществляется выдавливание брикета из участка полости матрицы, имеющего больший диаметр, в участок меньшего диаметра, при сохранении силы $P_{\text{п}}$, действующей на верхний торец заготовки. При этом в брикете также происходят локальные сдвиги, способствующие устраниению пор.

Образцы для последующих испытаний формовали по двум схемам, предусматривающим сдвиги в образце в меньшей и большей степенях.

Первая схема деформирования включала в себя формование заготовки с одновременным ее перемещением из верхней цилиндрической полости матрицы диаметром 32 мм в нижнюю цилиндрическую полость диаметром 36 мм, которое осуществлялось вследствие движения матрицы вверх.

Вторая схема деформирования включала в себя те же операции, что и первая, а затем выдавливание заготовки из полости диаметром 36 мм в полость диаметром 32 мм (рис. 3б) при сохранении силы $P_{\text{п}}$, действующей на верхний торец заготовки, которое осуществлялось вследствие движения матрицы вниз.

При первой схеме деформирования давление на торце нижнего образца фиксировалось на величине 800 МПа, при второй схеме деформирования перед началом обжатия — на величине 400 МПа.

В настоящее время утвержденные стандартами способы оценки деформируемости порошковых

композиций были сформулированы по отношению к схеме их уплотнения, приведенной на рис. 1. Поэтому эти способы не удовлетворяют современному развитию технологии.

В последние годы широкое распространение при изучении пластических свойств материалов получили схемы сложного деформирования образцов. Последние подвергаются в эксперименте одновременному воздействию комбинаций нагрузок: растягивающей (сжимающей) силы и крутящего момента; внутреннего (внешнего) давления и либо крутящего момента, либо растягивающей (сжимающей) силы. Эти эксперименты позволяют определять деформации, в том числе, предельные.

Применение указанных схем нагружения при исследовании деформационных свойств пористых неспеченных материалов на образцах, изготовленных по схеме, приведенной на рис. 1, ограничивается высокой хрупкостью этих образцов.

Недостаток утвержденных стандартами методов оценки качества формуемых порошковых заготовок ощущают также специалисты в области порошковой металлургии. Поэтому они разрабатывают оригинальные методы испытаний.

Оценка качества порошковых заготовок методом сдвиговой прочности с комбинированной нагрузкой

В достаточно полной мере оценку качества порошковых заготовок позволяют получить испытания материала на сдвиговую прочность комбинированной нагрузкой [3, 11].

Деформацию пористого тела проводят в установках трехосного нагружения при сочетании осевых и боковых нагрузок, приложенных к цилиндрическим образцам, рис. 4а, б.

При реализации этих схем испытаний существует много сложностей, что требует проведения работ в специализированных исследовательских лабораториях.

В нашем случае высокая плотность образцов до спекания позволяет применять для испытания на сдвиговую прочность штамп, в котором не создают дополнительного осевого напряжения, рис. 4б.

Показанный на рис. 4в штамп состоит из следующих элементов: 1 — образец; 2 — нож; 3 — пуансон.

Были изготовлены два приспособления по схеме на рис. 4в для определения напряжения разрушения при срезе $\tau_{\text{ср}}$, отличающихся друг от друга только диаметрами кольцевых ножей для разрезки цилиндрических заготовок, получаемых вследствие реали-

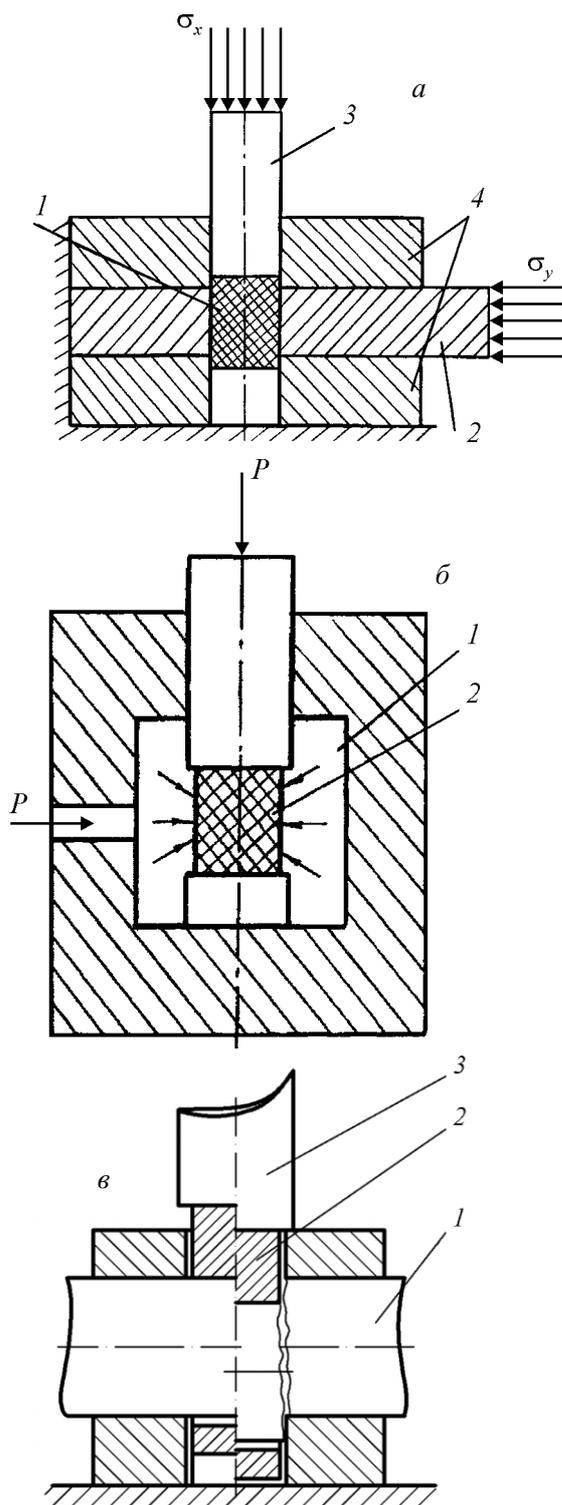


Рис. 4. Схемы установок для испытания порошковых заготовок: *а* — разрушением (*1* — образец, *2* — нож, *3* — пуансон, *4* — плиты), *б* — на сдвиговую прочность без дополнительного осевого напряжения (*1* — камера под давлением, *2* — заготовка), *в* — на сдвиговую прочность (*1* — образец, *2* — нож, *3* — пуансон).

зации первой схемы деформирования с диаметром $d = 36$ мм и второй схемы деформирования с диаметром $d = 32$ мм.

Величину касательного напряжения на поверхности среза $\tau_{ср}$ определяли по формуле:

$$\tau_{ср} = \frac{F}{2S}, \quad (1)$$

где F — фиксируемая величина силы (максимальная), при которой происходит срез, Н; $2S$ — суммарная площадь среза образца по двум поверхностям, м².

Для определения величины касательного напряжения на поверхности среза $\tau_{ср}$ образца от указанных ниже факторов был проведен следующий эксперимент.

Помимо влияния схемы уплотнения на прочность формованного порошкового образца оценено также воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) порошка, предшествующей его уплотнению, а также МИО уже формованного образца. МИО проводили по схеме, приведенной в [12], с целью повышения плотности заготовок.

В эксперименте использовали порошковую шихту на основе железного порошка марки ПЖРВ3.200.28. и определяли влияние на величину $\tau_{ср}$ схемы деформирования, воздействия МИО на порошок, воздействия МИО на образец, влияния количества выполняющего роль смазки стеарата цинка, количества углерода (С) в порошковой шихте. Углерод вводили в порошковую шихту, как легирующую добавку для повышения прочности детали после ее спекания. Также исследовали совместное влияние схемы деформирования и МИО порошка на величину $\tau_{ср}$.

Воздействующим факторам были присвоены следующие обозначения: схема деформирования — X_1 ; наличие МИО порошка и заготовки — X_2 и X_3 , соответственно; содержание стеарата цинка, масс. % — X_4 ; содержание углерода, масс.% — X_5 .

Факторы в эксперименте варьировали на двух уровнях (таблица). Планирование позволило сократить эксперимент до восьми опытов, отдельные опыты были продублированы для определения дисперсии воспроизводимости эксперимента и проведения последующего статистического анализа его результатов.

По полученным результатам $\tau_{ср}$ изменялось от 13,2 до 30 МПа.

После проведения и обработки результатов опытов получено уравнение регрессии:

$$\tau_{ср} = 14,38 + 12,78X_1 - 0,38X_2 + 2,12X_3 + 2,84X_4 - 4,7X_5. \quad (2)$$

Таблица

Факторы и уровни их варьирования		
№ п/п	Фактор	X_i
1	Схема деформирования:	
	первая	0
2	Порошок:	
	наличие МИО	0
3	Заготовка:	
	отсутствие МИО	1
4	наличие МИО	0
	отсутствие МИО	1
5	Содержание стеарата цинка, масс.%	0,5 – 1
5	Содержание углерода, масс.%	0 – 0,6

Обсуждение результатов

Установлено сильное влияние схемы деформирования на прочность образца. Так, при средней величине касательного напряжения на поверхности среза $\tau_{ср}$, равной 22,36 МПа, схема деформирования изменяет это напряжение на 12,78 МПа: от 15,25 до 28,03 МПа, то есть $\tau_{ср}$ увеличивается при второй схеме деформирования в 1,84 раза по сравнению с первой схемой. Таким образом, более интенсивное действие сдвигов в материале формируемого образца оказывает наиболее значительное влияние на его сопротивление срезу образца до его спекания.

МИО порошка приводит к снижению $\tau_{ср}$ сформованного образца как при применении первой схемы деформирования, так и при применении второй схемы. В то же время, МИО уже сформованного образца увеличивает его $\tau_{ср}$ вне зависимости от схемы деформирования. Это снижение $\tau_{ср}$ объясняется тем, что МИО выравнивает остаточные напряжения в образце до некоторого среднего значения, при этом остаточные напряжения более равномерно распределяются в объеме образца.

Как при первой, так и при второй схемах деформирования, $\tau_{ср}$ выше при большем содержании пластификатора (стеарата цинка), выполняющей роль смазки. Это объясняется тем, что смазка способствует снижению трения между частицами и позволяет достичь при формировании большей плотности образца.

Увеличение количества углерода в шихте оказало противоположное действие по сравнению с увеличением количества пластификатора. Это можно объяснить тем, что имеющий пластинчатую структуру порошок углерода, распределенный между зёрнами железного порошка, способствует началу скопления зёрен порошка друг относительно друга при разрушении под действием сдвигающих напряжений.

Заметим, что описанное влияние содержания в шихте стеарата цинка и углерода характерны только

при испытаниях образцов, не подвергнутых спеканию. В процессе спекания стеарат цинка выгорает, а углерод взаимодействует с частицами железного порошка, осуществляя его легирование.

Практическая значимость предлагаемого сравнительно несложного метода испытания качества сформованных порошковых заготовок заключается в том, что качество оценивается на ранней стадии технологического процесса, то есть до спекания деталей.

Спекание порошковых деталей проводили в специальных печах с восстановительной или защитной атмосферами. В этих печах осуществляется ступенчатый нагрев заготовок с выдержками для выгорания пластификатора и для остужения спеченных деталей в защитной атмосфере до температур ниже тех, при которых происходит интенсивное окисление материала. Сказанное показывает, что операция спекания — одна из самых дорогостоящих в процессах порошковой металлургии. Возможность проконтролировать качество заготовок до спекания позволяет получить существенную экономию материальных ресурсов.

Как показало сравнение двух схем деформирования, разработанный метод оценки качества сформованных заготовок наиболее эффективен при использовании современных способов формирования, предусматривающих существенные сдвиги между частицами формируемого порошка.

Заключение

Представлены физическая, механическая и математическая модели формирования порошковых заготовок.

Установлено сильное влияние схемы деформирования на прочность образца. Более интенсивное действие сдвигов в материале формируемого образца оказывает наиболее значительное влияние на его сопротивление срезу образца до его спекания.

МИО порошка привело к снижению $\tau_{ср}$ сформованного образца, что было трудно предположить до проведения эксперимента.

Предложен несложный метод испытания качества сформованных порошковых заготовок, когда качество оценивается на ранней стадии технологического процесса, то есть до спекания деталей. Разработанный метод оценки качества сформованных заготовок наиболее эффективен при использовании современных способов формирования, предусматривающих существенные сдвиги между частицами формируемого порошка

Данная работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ

в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. Grigoriev S.N., Gribkov A.A. Methods of increasing the productivity of precision batch proportioning of granular materials. Measurement techniques, 2012, v. 55, iss. 6, p. 643 – 647.
2. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N. Distribution of the density of material in the pressing channel in continuous forming of nanocrystalline composite powders. Metal Science and Heat Treatment, 2012, v. 54, no. 3 – 4, p. 135 – 138.
3. Krasnovskii A.N., Grigoriev S.N. A study of the process of continuous forming of nanocrystalline composite powders. Metal Science and Heat Treatment, 2012, v. 54, no. 1 – 2, p. 13 – 16.
4. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N. Study of the triboengineering characteristics of ultradispersed composite powder materials. Journal of Friction and Wear, 2011, v. 32, no. 3, p. 164 – 166.
5. Dmitriev A.M., Grigoriev S.N., Korobova N.V., et al. A study of the quality of preforms from iron-base powders produced by forming combined with sintering by electric current pulses. Metal Science and Heat Treatment, 2012, v. 54, iss. 1 – 2, p. 17 – 21.
6. Adaskin A.M., Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Kashirtsev V. Cemented carbides for machining of heat-resistant materials. Advanced Materials Research, 2013, v. 628, p. 37 – 42.
7. Дальский А.М., Барсукова Т.М., Вязов А.Ф. и др. Технология конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 2005, 592 с.
8. Дмитриев А.М., Крук А.Т., Хван А.Д. Улучшение эксплуатационных и технологических свойств элементов конструкций пластическим деформированием. Воронеж, Изд-во Воронеж. Гос. ун-та, 2011, 216 с.
9. Ponomarev A.S., Sosenushkin E.N., Klimov V.N. Effect of process features of pressure treatment on the microstructure and quality of parts of pipeline fittings from high-strength cast iron. Metal science and heat treatment, 2012, v. 54, iss. 1 – 2, p. 22 – 27.
10. Nepershin R.I. Shaping a thin-walled cylindrical shell on a three-roll bending machine. Mechanics of solids, 2011, v. 46, iss. 4, p. 554 – 562.
11. Перельман В.Е. Формирование порошковых материалов. М.: Металлургия, 1979, 232 с.
12. Дмитриев А.М., Ступников В.П. Повышение плотности заготовок при формовании на прессах. Кузнечно-штамповочное производство, 2001, № 1, с. 24 – 28.

References

1. Grigoriev S.N., Gribkov A.A. Methods of increasing the productivity of precision batch proportioning of granular materials. Measurement techniques. 2012, vol. 55, issue 6, pp. 643 – 647.
2. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N. Distribution of the density of material in the pressing channel in continuous forming of nanocrystalline composite powders. Metal science and heat treatment, 2012, vol. 54 (3 – 4), pp. 135 – 138.
3. Krasnovskii A.N., Grigoriev S.N. A study of the process of continuous forming of nanocrystalline composite powders. Metal science and heat treatment, 2012, vol. 54 (1 – 2), pp. 13 – 16.
4. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N. Study of the triboengineering characteristics of ultradispersed composite powder materials. Journal of friction and wear, 2011, vol. 32 (3), pp. 164 – 166.
5. Dmitriev A.M., Grigoriev S.N., Korobova N.V., et al. A study of the quality of preforms from iron-base powders produced by forming combined with sintering by electric current pulses. Metal science and heat treatment, 2012, vol. 54, issue 1 – 2, pp. 17 – 21.
6. Adaskin A.M., Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Kashirtsev V. Cemented carbides for machining of heat-resistant materials. Advanced materials research, 2013, vol. 628, pp. 37 – 42.
7. Dalsky A.M., Barsukova T.M., Vyazov A.F. et al. *Tekhnologiya konstruktivnykh materialov* [Technology of structural materials]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2005, 592 p.
8. Dmitriyev A.M., Kruk A.T., Khvan A.D. *Uluchsheniye ekspluatatsionnykh i tekhnologicheskikh svoystv elementov konstruktivnykh plasticheskim deformirovaniyem* [Increase of exploitation and technological properties of structural elements by plastic deformation]. Voronezh, Russia, Voronezh State Univ. Publ., 2011, 216 p.
9. Ponomarev A.S., Sosenushkin E.N., Klimov V.N. Effect of process features of pressure treatment on the microstructure and quality of parts of pipeline fittings from high-strength cast iron. Metal science and heat treatment, 2012, vol. 54, issue 1 – 2, pp. 22 – 27.
10. Nepershin R.I. Shaping a thin-walled cylindrical shell on a three-roll bending machine. Mechanics of solids, 2011, vol. 46, issue 4, pp. 554 – 562.
11. Perelman V.E. *Formirovaniye poroshkovykh materialov* [Formation of powder materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 232 p.
12. Dmitriyev A.M., Stupnikov V.P. *Povysheniye plotnosti zagotovok pri formovanii na pressakh* [Increase of articles density under pressing]. *Kuznechno-shtampovochnoye proizvodstvo — Forging and stamping production*, 2001, no. 1, pp. 24 – 28.

Статья поступила в редакцию 15.10.2013 г.

Григорьев Сергей Николаевич — ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН” (г. Москва), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, ректор, специалист в области разработки и создания высокотехнологических процессов нанесения покрытий различного функционального назначения. E-mail: rector@stankin.ru.

Дмитриев Александр Михайлович — ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН” (г. Москва), Государственный инженеринговый центр, главный научный сотрудник, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, специалист в области технологий и машин обработки давлением.

Коробова Наталья Васильевна — ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН” (г. Москва), Государственный инженеринговый центр, доктор технических наук, директор центра, специалист по технологиям и машинам обработки давлением. E-mail: mt-6@yandex.ru.

Research strength blanks, formed from iron powder

S. N. Grigoriev, A. M. Dmitriev, N. V. Korobova

The design of forming of powder blanks by highly effective schemes is described. It provides intense shifts between particles of the forming powder. To assess the quality of the formed blanks before their expensive sintering, the original method of the testing by the cutting of the pieces on a simple device is designed. Based on the experimental study of the cutting stress of the workpiece subject to the deformation at its forming, the influence of magnetic-pulse treatment and the composition of the powder mixture, the mathematical model is described.

Keywords: powder compositions based on iron, cold forming, quality hardness-test by cutting in the dies, mathematical model of the shear stress

Grigoryev Sergey — Moscow State University of Technology STANKIN, DrSci (Eng), professor, rector, head of department, e-mail: rector@stankin.ru.

Dmitriyev Aleksandr — Moscow State University of Technology STANKIN, DrSci (Eng), corr. member of Russian Academy of sciences, chief researcher.

Korobova Natalya — Moscow State University of Technology STANKIN, DrSci (Eng), director of department, e-mail: mt-6@yandex.ru.