

УДК 621.983

*д.т.н. Рябичева Л. А.*  
*(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),*  
*к.т.н. Коробко Т. Б.*  
*(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),*  
*Королько В. В.*  
*(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

### **ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПРИ СВОБОДНОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ**

*В статье представлено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании порошковой пористой заготовки. Показано его влияние на структурообразование и твердость. Получено, что наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в очаге деформации при меньшей исходной пористости порошковой заготовки. Микротвердость и толщина упрочненного слоя зависят от пористости и относительной толщины, от степени толстостенности и относительного натяга.*

**Ключевые слова:** свободное дорнование, интенсивность напряжений, гидростатическое давление, структурообразование, микротвердость.

В настоящее время в машиностроении имеется большое количество разнообразных деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности изготовления и высокой твердости рабочего поверхностного слоя. Типичными и наиболее массовыми представителями данных деталей являются детали типа тел вращения: втулки, кольца, фланцы и т. д. К наиболее эффективным методам улучшения качества деталей относятся способы поверхностного пластического деформирования, в частности дорнование [1]. Дорнование обладает способностью к формированию инструментом упрочненного поверхностного слоя в обрабатываемой заготовке со специфическим расположением волокон металла, за счет которого долговечность этой детали возрастает в 1,5–2 раза. Точность деталей и качество их поверхностного слоя обеспечиваются распределением остаточных деформаций и напряжений.

Процессам дорнования отверстий свойственны многие характерные признаки холодной обработки металлов давлением: упрочнение металла при его пластическом деформировании, изменение линейных

размеров обрабатываемых заготовок, трение и высокие давления на контактных поверхностях и др. [2].

Свободное дорнование характеризуется осесимметричным напряженным состоянием, при котором напряжения, действующие в плоскостях, перпендикулярных направлениям течения металла, являются главными. Поэтому компоненты всех касательных напряжений равны нулю. При дорновании возникают три составляющие деформации, из которых две могут быть положительными (отрицательными), а одна отрицательной (положительной) [3].

В подавляющем большинстве работ по проблемам дорнования исследовали дорнование отверстий в деталях из компактных сталей [4, 5]. В машиностроении нашли широкое применение детали из цветных металлов и сплавов на их основе, полученные операциями порошковой металлургии, — подшипники скольжения, втулки, ролики, при работе которых необходима высокая прочность внутренней поверхности отверстий. В направлении увеличения плотности порошковых деталей выполнена работа авторов [6], в которой рассматрива-

ется распределение плотности и накопленной деформации порошковых прессовок в различные моменты деформирования.

Поэтому актуальным является исследование напряженно-деформированного состояния и уплотнение порошковых заготовок.

Медь и ее сплавы являются распространенными материалами для изготовления деталей приборов, деталей электротехнического назначения из порошковых материалов. Медь имеет низкую прочность и высокую пластичность, поэтому представляет интерес разработать методы повышения прочности деталей из порошковой меди дорнованием.

**Целью** работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании отверстий в заготовках из порошковой меди и его влияние на структурообразование и твердость.

**Объект исследования** — технологический процесс свободного дорнования порошковых пористых заготовок.

**Предмет исследования** — напряженно-деформированное состояние, структурообразование, твердость при свободном дорновании порошковых пористых заготовок.

**Задачи исследования:**

– компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании порошковых пористых заготовок;

– анализ интенсивности напряжений и гидростатического давления и их влияние на уплотнение;

– исследование структурообразования на внутренних и внешних слоях порошковой пористой заготовки при свободном дорновании;

– исследование твердости по Бринеллю и микротвердости на внутренних и внешних слоях порошковой пористой заготовки при свободном дорновании.

Рассматривали свободное дорнование отверстия в детали по схеме сжатия. Деталь имела размеры: исходный внутренний диаметр  $d_0 = 9,8$  мм, наружный диаметр

$D_0 = 28$  мм, высота  $H = 20$  мм. Материал — медь с исходной пористостью 6, 15 и 24 %.

Параметры дорна: дорн однозубый, диаметр по ленточке  $d = 10$  мм; ленточка шириной  $b = 1$  мм; угол заборного конуса  $\alpha = 4^\circ$ ; угол обратного конуса  $\alpha_1 = 4^\circ$ ; в месте перехода конической части дорна в цилиндрическую кромка скруглена до  $R = 0,2$  мм. Натяг дорнования принимался равным  $i = 0,2$  мм. Скорость дорнования  $v = 2$  мм/с. При моделировании дорн и опора считались абсолютно жесткими объектами.

При дорновании напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и детали обычно превышают величину напряжения текучести материала втулки  $\sigma_s$  или соизмеримы с ним. Поэтому для описания трения в таких условиях процесса использовали формулу Зибеля —  $\tau_f = m\sigma_s$ , где  $m$  — фактор трения; для процессов холодной деформации при наличии смазки следует принять  $m = 0,08$ .

Моделирование выполняли в пакете инженерного анализа Deform 10.2, в котором используется метод конечных элементов. Данный пакет позволяет моделировать деформирование спеченных металлов с пористостью до 30 %, при этом плотность материала рассчитывается и обновляется в процессе моделирования. Кривые упрочнения пористого материала рассчитываются на основе кривых упрочнения материала основы с учетом текущей пористости.

На рисунке 1 показана картина распределения интенсивности напряжений в стенке полый детали с различной исходной пористостью материала при свободном дорновании. На рисунке 2 представлены профили интенсивности напряжений в поперечном сечении очага деформации полый детали при различной исходной пористости материала.

Как видно из рисунка 1, наибольшая интенсивность напряжений 220 МПа наблюдается в очаге деформации при исходной пористости 6 %. С ростом пористости материала величина интенсивности на-

пряжений уменьшается и при 24 % составляет 145 МПа. Наибольшая величина очага деформации, в котором происходит и уплотнение материала, также наблюдается в материале при пористости 6 %.

Ход кривых интенсивности напряжений в очаге деформации при данных значениях пористости материала одинаков (рис. 2, а). При этом профили отличаются размерами очага деформации. Если при пористости 6 % длина очага деформации составляет 1,8 мм, то при пористости 15 % она равна 1,4 мм, а при 24 % — 1 мм. Такое изменение размера очага деформации свидетельствует о том, что именно при больших значениях исходной пористости в начальный период дорнования происходит структурная деформация.

Интенсивность напряжений по величине наибольшая у полой детали с исходной пористостью 6 % (рис. 2, а). Отсюда следует, что сила при дорновании полого цилиндра из материала с меньшей пористостью затрачивается на преодоление сопротивления деформированию твердой фазы, а с большей пористостью — на выполнение структурной деформации.

Гидростатическое давление характеризует изменение объема материала заготовки, что очень важно для пористых материалов, для которых не соблюдается закон

постоянства объема, а соблюдается закон постоянства массы. Величина гидростатического давления дает возможность проследить трансформацию очага деформации в очаг уплотнения [6].

Как видно из рисунка 2, б, для всех исследуемых случаев происходит рост гидростатического давления до некоторого увеличения очага деформации, который в данном случае трансформируется в очаг уплотнения. При этом гидростатическое сжатие обеспечивает уплотнение материала.

В стенке полой заготовки с начальной пористостью 6 % длина очага уплотнения достигает 3,8 мм вследствие того, что за пределами геометрического очага уплотнения взаимные перемещения и относительное течение частиц металла пренебрежимо малы. Движение внешней границы очага представляет собой движение точек твердого тела; векторы скорости всех точек движущейся зоны в любой момент времени равны по величине и направлению. На расстоянии более 3,8 мм возникают растягивающие напряжения, препятствующие уплотнению материала. Для пористостей 15 и 24 % длина очага уплотнения составляет 2 и 1,8 мм соответственно, что и объясняет низкую величину относительной плотности материала.

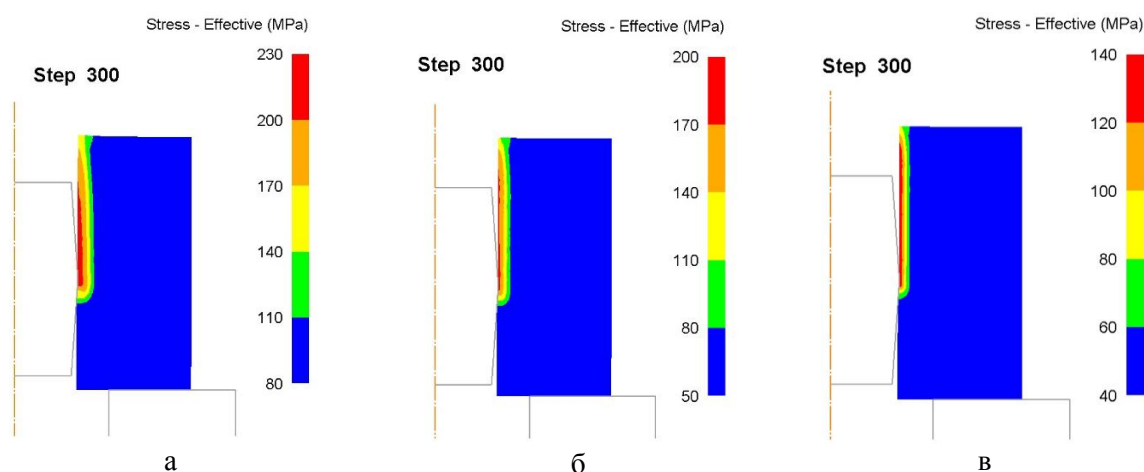


Рисунок 1 Распределение интенсивности напряжений в стенке полого цилиндра с разной исходной пористостью (а — 6 %; б — 15 %; в — 24 %)

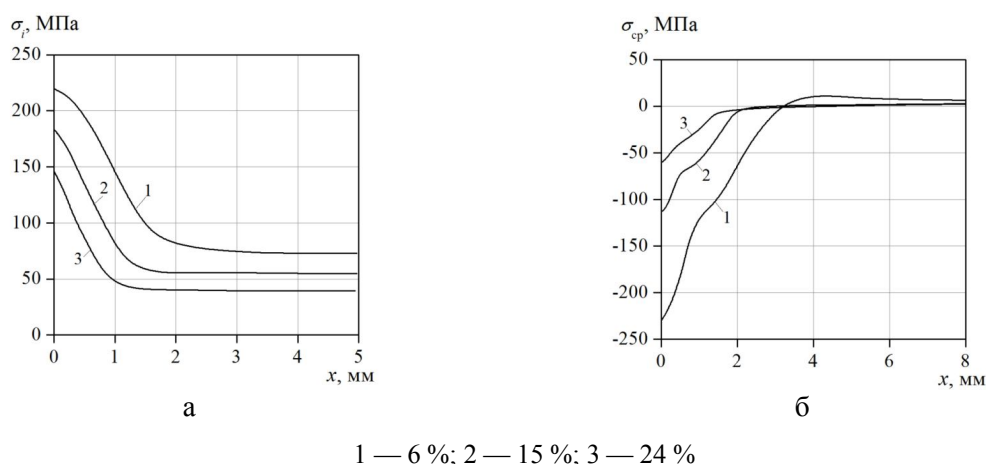


Рисунок 2 Профили интенсивности напряжений (а) и гидростатического давления (б) в очаге деформации при различной исходной пористости материала

При дорновании полый заготовки с исходной пористостью 6 % создаются более высокие сжимающие напряжения вследствие пластической деформации твердой фазы. У полых заготовок с большей исходной пористостью эти величины меньше, что и объясняет невозможность получения высокой плотности материала при дорновании.

В результате свободного дорнования пористых полых заготовок состояние их внутренней поверхности изменилось: она стала более качественной с менее заметной пористостью, образовалась своего рода плотная металлическая «рубашка» при оставшемся пористом наружном слое. На рисунках 3–5 представлена микроструктура пластически деформированных внутреннего и наружного слоёв заготовки образца после дорнования. Съемки выполняли на оптическом микроскопе МИМ-8 и на растровом электронном микроскопе РЭММА-102.

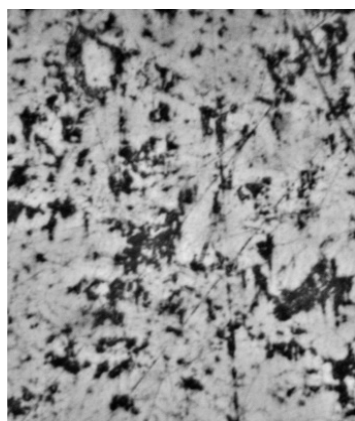
Микроструктуру изучали на образцах, полученных дорнованием пористых заготовок с исходной пористостью 15 %, с относительным натягом  $i/d_0 = 0,02$  дорном с  $d = 10$  мм, углом заборного конуса  $\alpha = 4^\circ$ . Шлифы вырезали по внутренней и внешней поверхностям заготовки вдоль вертикальной оси.

Исходные структуры пористых образцов после спекания при 900–920 °С в среде генераторного газа характеризуются нали-

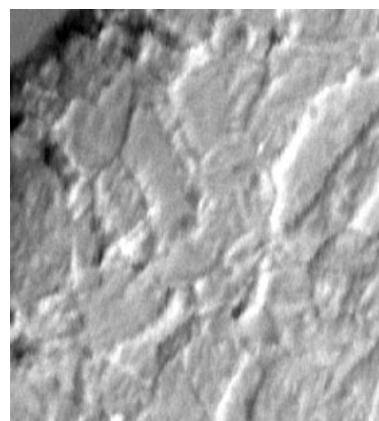
чием зерен меди и пор. На рисунке 3, а показана микроструктура медных образцов после спекания при увеличении 500. Наблюдается значительная разнорзернистость, видны поры. Появление разнорзернистости связано с неравномерным развитием статической рекристаллизации при спекании вследствие неоднородного напряженного состояния, которое создается при прессовании исходного полого образца [6, 9]. На рисунке 3, б показана микроструктура при увеличении 4000. Видны практически бездефектные границы зерен разной величины. После спекания средняя величина зерна на меди равна 31–32 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила НВ 58.

В результате дорнования во внешних слоях полый заготовки микроструктура металла претерпевает незначительные изменения, что связано с наличием некоторого гидростатического сжатия и дробления зерна за счет локального повышения внутренних напряжений (рис. 4).

На рисунке 4, а показана микроструктура внешнего слоя при увеличении 500. Следует отметить дробность зерна вследствие незначительной пластической деформации внешних слоев. Заметно искажение формы зерна, большая его дробность и наличие пор (рис. 4, б). Средняя величина зерна составила 15–18 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила НВ 92.

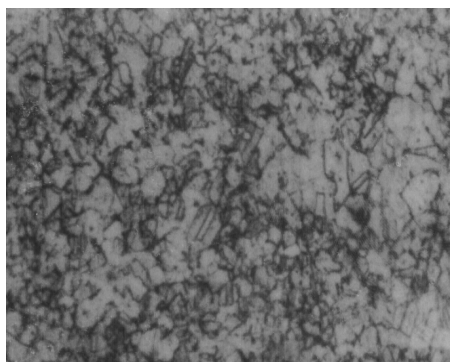


а

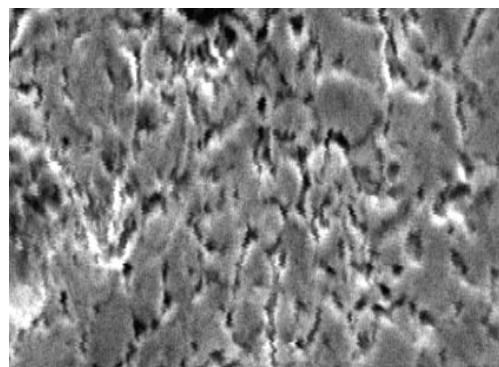


б

Рисунок 3 Микроструктура внутренней поверхности полого образца пористостью 15 % после спекания при увеличении: а —  $\times 500$ ; б —  $\times 4000$

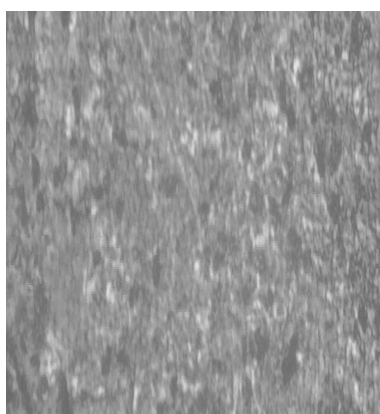


а

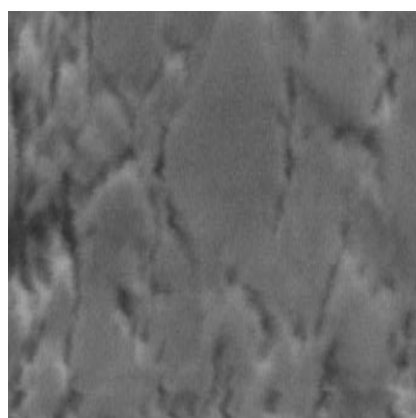


б

Рисунок 4 Микроструктура внешних слоев полой заготовки после дорнования при увеличении: а —  $\times 500$ ; б —  $\times 4000$



а



б

Рисунок 5 Микроструктура внутреннего слоя полой заготовки после дорнования при увеличении: а —  $\times 500$ ; б —  $\times 5000$

Для внутреннего слоя образца после дорнования характерна вытянутость зерен в направлении перемещения дорна, обеспечивающего осевое течение металла (рис. 5, а). При большем увеличении видно размытие зерен вследствие большой степени деформации и отсутствие пор (рис. 5, б). Средняя величина зерна составила 7–9 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила HB 105.

Деформационное упрочнение материала изучали методом измерения микротвердости на образцах, полученных дорнованием пористых заготовок с исходной пористостью 6, 15, 24 %, с относительным натягом  $i/d_0 = 0,02$  дорном с  $d = 10$  мм, углом заборного конуса  $\alpha = 4^\circ$ . На первом этапе микротвердость определяли непосредственно после дорнования отверстия, на втором — после отжига по режиму: нагрев до температуры 500–550 °С, выдержка, охлаждение на воздухе.

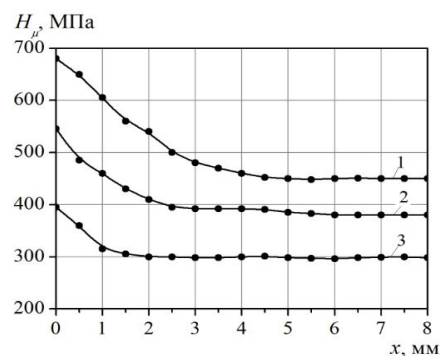
На рисунке 6, а показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий ( $d_0 = 9,8$  мм) при различной исходной пористости образцов. Каждая точка на графиках представляет собой среднее арифметическое не менее десяти измерений. Анализ этих зависимостей позволяет констатировать следующее.

С увеличением пористости образцов величина микротвердости уменьшается. Причиной является наличие остаточной пористости. При этом упрочнение охватывает толщину поверхностного слоя в пределах 1,6 мм для пористости 24 % и 2 мм для пористости 6 %.

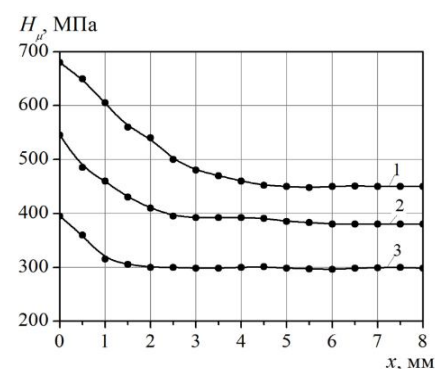
На рисунке 6, б показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при различной степени толстостенности  $D_0/d_0$  1,63; 2,24; 2,86. С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя, что связано с ростом контактных давлений и гидростатического сжатия в этих слоях образцов.

Исследовали зависимость микротвердости образцов из порошковой меди с исходной пористостью 15 %, длиной заго-

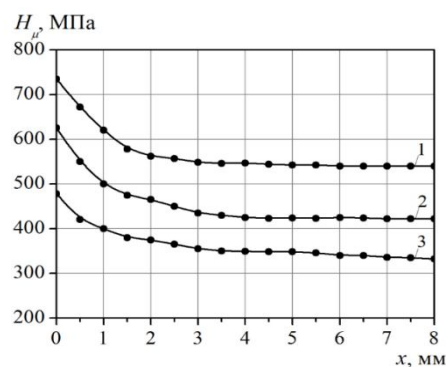
товки  $L_0 = 20$  мм, наружным диаметром  $D_0 = 28$  мм. Относительный натяг составлял,  $i/d_0$ , %: 2,0; 5,3; 8,7.



а



б



в

Рисунок 6 Зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при: а — различной исходной пористости образцов (1 — 6%; 2 — 15%; 3 — 24%); б — различной степени толстостенности (1 — 1,63; 2 — 2,24; 3 — 2,86); в — различной величине относительного натяга (1 — 2,0%; 2 — 5,3%; 3 — 8,7%)

На рисунке 6, в показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при различной величине относительного натяга 0,02; 0,053; 0,087. С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя и его толщина, что связано с ростом объема металла, участвующего в пластической деформации.

Отжиг влияет на микроструктуру. Он приводит к незначительному увеличению зерна как в наружных слоях, так и во внутренних слоях отверстия. В результате твердость по Бринеллю и микротвердость несколько уменьшаются. Твердость по Бринеллю на внутренних слоях отверстия составила в среднем НВ 92–98, на внешних слоях образца — НВ 83–85.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Компьютерным моделированием показано, что наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в очаге деформации при исходной пористости порошковой заготовки, равной 6 %. С ростом пористости материала величина интенсивности напряжений уменьшается. Наибольшая величина очага деформации, в котором происходит и

уплотнение материала, также наблюдается в материале при пористости 6 %.

2. При всех значениях пористости порошковых заготовок наблюдается рост гидростатического сжатия до некоторого увеличения очага деформации, который трансформируется в очаг уплотнения, что и обеспечивает уплотнение материала.

3. Установлено, что неравномерность напряженно-деформированного состояния влияет на структурообразование при свободном дорновании порошковой медной заготовки. Во внутреннем поверхностном слое полой заготовки величина зерна минимальна, во внешнем слое величина зерна больше.

4. Получено, что микротвердость и толщина упрочненного слоя зависит от пористости и относительной толщины, от степени толстостенности и относительного натяга. С увеличением исходной пористости образцов уменьшаются величина микротвердости и толщина упрочненного слоя. С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости и толщины упрочненного слоя. С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя и его толщина.

### Библиографический список

1. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий [Текст] / Ю. Г. Проскуряков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
2. Скворцов, В. Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра [Текст] / В. Ф. Скворцов, А. Ю. Арляпов. — Томск : ТПУ, 2005. — 92 с.
3. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] : справочник / Л. Г. Одинцов. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.
4. Воронцов, А. Л. Исследование процесса дорнования отверстий [Текст] / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. — 2010. — № 10. — С. 3–8.
5. Алешин, А. В. Исследование характера течения металла при установке втулки в корпус с торцевым уплотнением методом дорнования [Текст] / А. В. Алешин, А. М. Роговой, В. А. Хоменко // Ползуновский вестник. — 2002. — № 1. — С. 159–163.
6. Эволюция распределения плотности, накопленной деформации и топологических особенностей порошковых цилиндрических заготовок в условиях деформирующего протягивания [Текст] / О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, А. П. Майданюк [и др.] // Сверхтвердые материалы. — 2008. — № 2. — С. 81–91.

© Рябичева Л. А.  
 © Коробко Т. Б.  
 © Королько В. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ПуХЛ ЛГУ им. В. Даля Гутько Ю. И.,  
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДМ ДонГТИ Денищенко П. Н.*

*Статья поступила в редакцию 29.09.2022.*

**Doctor of Technical Sciences Riabicheva L. A.** (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com), **PhD in Engineering Korobko T. B.** (DonSTI, Alchevsk, LPR, korobko.tamara@rambler.ru), **Korolko V. V.** (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR)

**INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE ON STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES DURING FREE MANDRELLING OF POWDERED BLANK HOLES**

*The article presents a computer simulation of the stress-strain state during free mandrelling of a powdered porous blank. Its influence on structure formation and hardness is shown. It is found that the greatest intensity of stresses is observed in the deformation focus at a lower initial porosity of the powdered blank. The microhardness and thickness of the hardened layer depends on the porosity and relative thickness, on the degree of thick-walled and relative tension.*

**Key words:** *free mandrelling, stress intensity, hydrostatic pressure, structural formation, microhardness.*