УДК 621.787.4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ШИРИНЫ КАНАВКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ НАНОСТРУКТУР МЕТОДОМ КОМПЛЕКСНОГО ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ**

**Радченко С. Ю., Дорохов Д. О., Грядунов И. М., Кисловский А.А.**

*Россия, г.Орел, ФБГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК»*

*В статье проводится анализ данных, полученных в ходе экспериментов по выявлению влияния геометрии формообразующего инструмента на процесс комплексного локального деформирования.*

*Ключевые слова: комплексное локальное деформирование; формообразующий инструмент; экспериментальная установка; упрочнение; геометрия инструмента.*

*The article analyzes the data obtained in the course of experiments to identify the effect of the geometry of the forming tool in the process of integrated local deformation.*

*Keywords: complex local deformation; forming tool; experimental setup, hardening, tool geometry.*

Требования к деталям машин в настоящее время достаточно высоки: необходимо определенное сочетание твердости, прочности, износостойкости и т.д. Часто традиционные методы упрочнения не способны обеспечить необходимое сочетание свойств. Поэтому интерес представляют технологии, которые при сохранении неизменным химического состава, габаритных размеров и т.д. позволяют достичь необходимых качественных и количественных показателей. Среди таких технологий методы деформационного упрочнения, основанные на комплексном локальном нагружении или деформировании (КЛД) заготовки – они сочетают в себе преимущества поверхностного и объемного упрочнения [1-12].

Технологическая схема процесса КЛД приведена на рис. 1 [1-12]. Данный метод позволяет производить упрочнение внутренней поверхности втулок с градиентом механических свойств по сечению. Упрочнение можно производить и от наружной поверхности.

|  |
| --- |
| с силой |
| ***Рис. 1.******Схема многоциклового комплексного локального***  ***деформирования с приложением осевой силы для упрочнения изделия от внутренней поверхности:*** *1 – заготовка; 2 – упор; 3 – прижим; 4 – дорн; 5 – валковая матрица;*  *Pос – осевая сжимающая сила* |

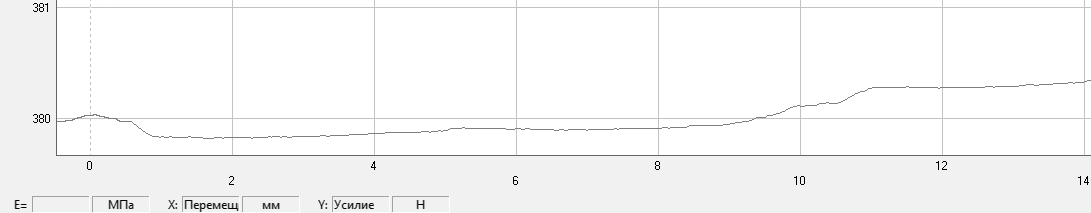
Обработка осуществляется следующим образом: заготовку *1* устанавливают на вращающийся упор *2*, к торцу прикладывают сжимающую силу *Pос*, создающую осевое напряжение посредством прижима *3*. Заготовке сообщают крутящий момент, затем внутреннюю поверхность формируют многократным возвратно-поступательным осевым перемещением раздающего пуансона-дорна *4*, имеющего участок бóльшим диаметром,   
а наружную поверхность – обкаткой с обжимом в роликовой матрице *5*, после чего разводят ролики, отводят прижим и извлекают готовую деталь.

Для обеспечения заданного комплекса свойств необходимо представлять, как на процесс упрочнения влияют такие параметры, как шаг, количество циклов деформирования, прикладываемая сила, геометрия инструмента [1-11]. Влияние геометрии формообразующего инструмента на процесс упрочнения практически не изучено.

Для исследования влияния геометрии формообра**з**ующего инструмента на процесс упрочнения комплексным локальным деформированием использовалась специальная оснастка (рис. 2), которая устанавливалась на разрывную машину Р-0,5 (свидетельство о поверке №3123/17 от 27.12.2013):

|  |
| --- |
|  |
| ***Рисунок 2 – Экспериментальная оснастка:*** *1 – корпус, 2 – болт крепления, 3- заготовка, 4 – корпус-портал, 5 – державка, 6 – нажимной винт, 7 – датчик силы, 8 – прижимной ролик, 9 – болт регулировочный* |

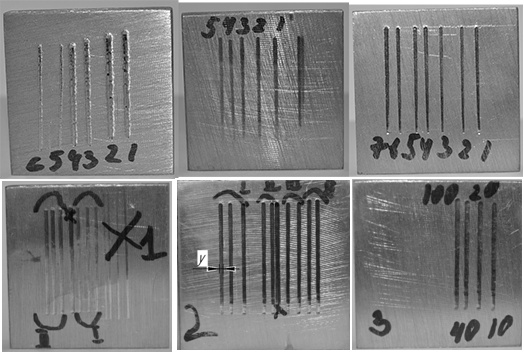
Корпус *1* устанавливается на подвижную траверсу разрывной машины и фиксируется болтом крепления *2*. Заготовка *3* закрепляется в корпусе-портале *4* идополнительно фиксируется с помощью двух прижимов. Корпус державки *5* соединен с разрывной машиной посредством верхнего зажима с датчиком силы. Державка закрепляет формообразующий инструмент и осуществляет постоянный его контакт с заготовкой. Сила, с которой внедряется инструмент, измеряется посредством тензодатчика *7* на 0,5 кН (или 5 кН) с чувствительностью 0,01 Н. Прикладываемая сила изменяется с помощью нажимного винта *6*. Прижимной ролик *8* предотвращает перекосы и покачивание державки. Регулировочные болты *9* фиксирует корпус-портал, а так же позволяют перемещать заготовку в горизонтальном направлении.



***Рисунок 3 – пример диаграммы силы, полученной программой Analyzer***

Силоизмерительный датчик подключается к компьютеру с предустановленным программным обеспечением Analyzer от фирмы «Тестсистемы», позволяющим: измерять силу в реальном времени и представлять результаты в виде диаграммы (рис. 3), в удобном формате хранить прочие сведения об испытании.

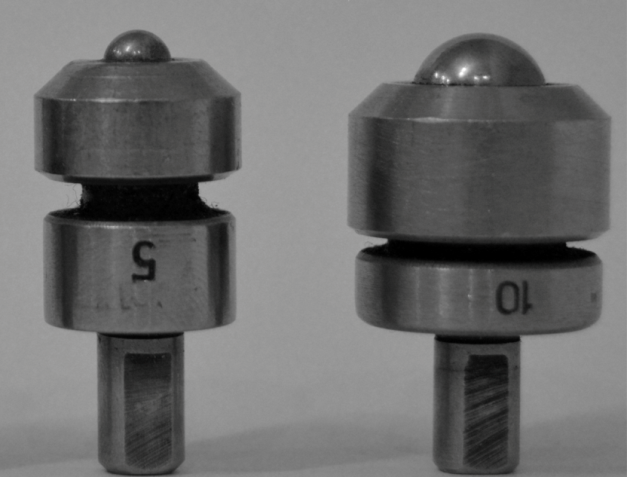
В качестве образцов использовались пластины из сплава БрО5Ц5С5 ГОСТ 613-79 размерами 10х40х40 мм (рис. 4).



***Рисунок 4 – образцы для испытаний:*** *y – ширина отпечатка*

Для измерения ширины отпечатка использовались фотографии высокого разрешения образцов, которые импортировались в графическое приложение. Сначала определялся масштаб по известным длине и ширине образца. Стандартными средствами графического приложения производились измерения ширины отпечатка и последующий ее перевод.

В роли формообразующего инструмента применялись шарики диаметром 5 и 10 мм (рис. 5).



***Рисунок 5 –*** *формообразующий инструмент, применяемый для испытаний*

Цель экспериментов – выяснить, как влияет диаметр формообразующего инструмента (шара), прикладываемая сила и скорость процесса на ширину оставляемого отпечатка.

Эксперимент проводился при двух сериях опытов в точках: сила P = (371±18) Н, диаметр d = (7,5±2,5) мм, скорость v = (60±40) мм/мин. Условия проведение эксперимента приведение в таблице 1:

***Таблица 1 – условия проведения полнофакторного эксперимента***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Характеристики плана | x1 = d | x2 = P | x3 = v |
| Нулевой уровень | 7,5 мм | 371 Н | 60 мм/мин |
| Интервал варьирования | 2,5 мм | 18 Н | 40 мм/мин |
| Верхний уровень | 10 мм | 389 Н | 100 мм/мин |
| Нижний уровень | 5 мм | 353 Н | 20 мм/мин |

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем:

1. Устанавливают исследуемую пластину, подготавливают инструмент и экспериментальную оснастку;

2. Задают силу внедрения ролика в заготовку, назначают скорость перемещения ролика;

3. Включают разрывную машину. Роликовый инструмент движется по прямолинейной траектории по телу заготовки. На компьютере в реальном времени стоится диаграмма силы по показателям, снятым с тензодатчика.

Далее приводится обработка результатов эксперимента.

Полученные в ходе эксперимента данные заносим в таблицу 2:

***Таблица 2 – расчет полнофакторного эксперимента***

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | **x0** | **x1** | **x2** | **x3** | **x12** | **x13** | **x23** | **x123** | **yi1** | | **yi2** | | | **yср** |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,05 | | 1,06 | | | 1,06 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1,04 | | 1,05 | | | 1,05 |
| 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0,95 | | 0,95 | | | 0,95 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 0,95 | | 0,93 | | | 0,94 |
| 5 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1,01 | | 0,99 | | | 1,00 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1,00 | | 1,01 | | | 1,01 |
| 7 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0,89 | | 0,88 | | | 0,89 |
| 8 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 | 0,90 | | 0,89 | | | 0,90 |
| **∑xiyсрi** | 7,785 | 0,195 | 0,425 | 0,015 | -0,005 | 0,025 | -0,005 | 0,005 | **Gp =** | | 0,31 | | | Критерий Кохрена |
| **bi** | 0,9731 | 0,0244 | 0,0531 | 0,0019 | -0,0006 | 0,0031 | -0,0006 | 0,0006 | **Gкр**= | | 0,79 | | | f1=1, f2=8, q=0,05 |
| **ti** | 863 | 21 | 47 | 1,661 | 0,554 | 2,435 | 0,554 | 0,554 | **Вывод:** дисперсии однородны | | | | | |
| **tкр=2,3** | **значим** | **значим** | **значим** | **незначим** | **незначим** | **незначим** | **незначим** | **незначим** | **f1** | **Fp** | | **Fкр** | **Вывод** | |
| **Линейная модель:** 0,97+0,024\*x1+0,053\*x2 | | | | | | | |  |  | 0,28 | | 4,94 | адекватна | |

Здесь х12, х13, х23, х123 – эффект взаимодействия факторов. Этот план соответствует модели

 (2)

Осуществим перевод модели к физическим переменным:

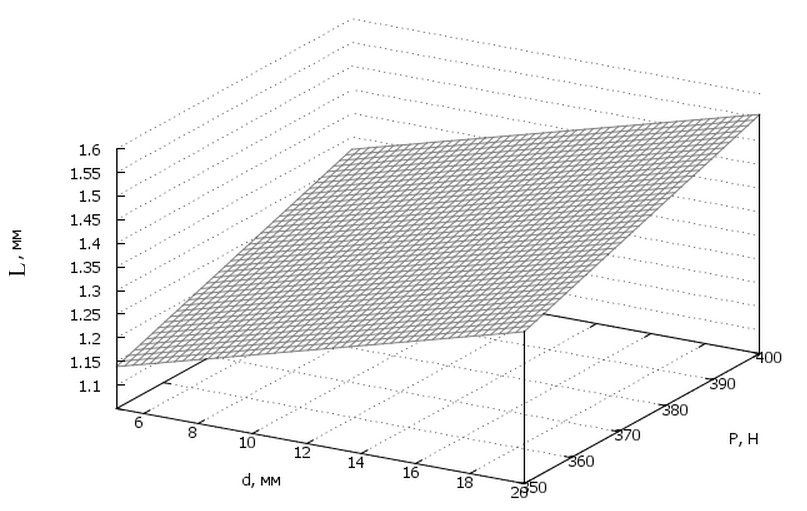
 (3)

где *L* – ширина отпечатка, мм; *d* – диаметр внедряемого инструмента в виде шара, мм; *P* – прикладываемая сила в Н.

Область применения полученного уравнения ограничена следующими условиями:

1. В качестве формообразующего инструмента должен выступать шарик диаметром от 5 до 10 мм.
2. Скорость перемещения инструмента от 20 до 100 мм/мин.
3. Диапазон прикладываемых сил 300…400 Н.

По полученной модели можем построить следующий график (рис. 6):



***Рисунок 6 – график, построенный по полученной модели:*** *y – ширана канавки, d – диаметр инструмента, P – прикладываемая сила*

***Рисунок 7 – сечения графика при d =5 и d = 10 мм***

Была проведена еще одна серия экспериментов для сравнения результатов измерений и вычислений по уравнению (3) (таб. 3). Следует отметить, что для всех результатов примерно выполняется соотношение , где P – прикладываемая сила, S – площадь контакта.

***Таблица 3 – ширина отпечатка, вычисленная по формулам (1) и (11)***

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Сила, Н** | **Ширина канавки при d = 5 мм** | | **Ширина канавки при d = 10 мм** | |
| **Измеренная, мм** | **Посчитанная по формуле (12), мм** | **Измеренная, мм** | **Посчитанная по формуле (12), мм** |
| 353 | 0,95 | 1,12 | 0,95 | 1,17 |
| 389 | 1,03 | 1,25 | 1,09 | 1,30 |
| 376 | 1,01 | 1,19 | 1,06 | 1,25 |
| 384 | 1,06 | 1,21 | 1,07 | 1,26 |
| 360 | 0,98 | 1,14 | 1,03 | 1,19 |

Для исследования интерес представляет формула, полученная В. М. Браславским для определения ширины впадины в начале обкатанной поверхности [14]:

 (4)

где *L* – ширина впадины в мм;

*P* – усилие обкатки в Н;

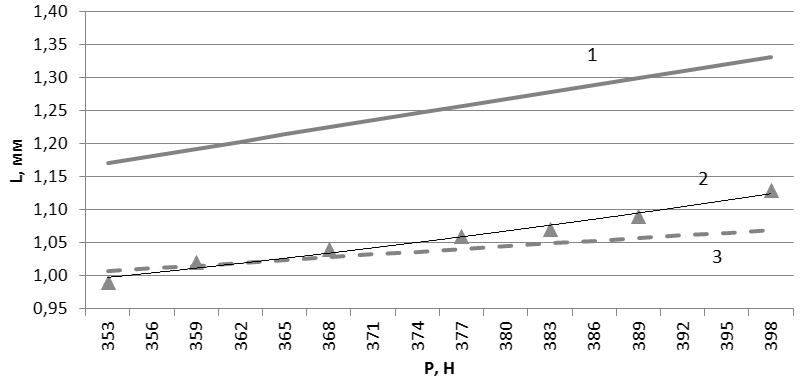
*HB* – твердость материала в МПа;

*k* – коэффициент;

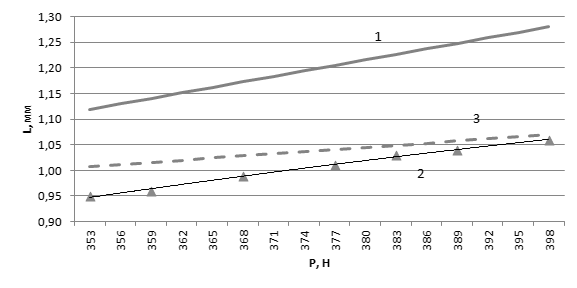
Эта формула также подходит для расчета ширина отпечатка и для процесса КЛД, однако коэффициент будет отличаться:

 (5)

Сравнение результатов измерений и вычислений по формулам (3) и (5) представлены в виде графиков:



***Рисунок 8 – сравнение графиков, полученных:*** *1 - по формуле (3); 2 – по измеренным значениям; 3 – по формуле (5). Диаметр шара d = 10 мм*

****

***Рисунок 9 – сравнение графиков, полученных:*** *1 - по формуле (3); 2 – по измеренным значениям; 3 – по формуле (5). Диаметр шара d = 5 мм*

Были проанализированы экспериментальные данные, полученные в ходе опытов для выяснения роли геометрии формообразующего инструмента на процесс КЛД. Получена линейная модель, показывающая степень влияния диаметра и прикладываемой к инструменту силы на ширину отпечатка.

Можно сделать вывод о том, что скорость перемещения инструмента не оказывает влияние на ширину отпечатка. В ходе эксперимента скорость варьировалась от 20 до 100 мм/мин. При обработке втулки диаметром 45 мм это соответствует диапазону частот вращения 4…21 об./мин.

Список литературы

1. Голенков, В. А. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием [Текст] / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, Г.П. Короткий. – М.: ООО «Издательство Машиностроение», Орел: Госуниверситет - УНПК, 2013. – 122 с.

2. Дорохов, Д.О. Управляемое формирование механических свойств в изделиях методом комплексного локального деформирования [Текст] / Д. О. Дорохов // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – Орел: ОрелГТУ, № 4(288). – Орел, ОрелГТУ, 2011 г., С 31-37

3. Голенков, В.А. Перспективы применения технологии «Валковая штамповка» для получения градиентных субмикро- и наноструктурных материалов [Текст] / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // [Известия Тульского государственного университета. Технические науки](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=531921). 2008. [№ 2](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=531921&selid=11716026). С. 123-128.

4. Голенков, В.А. Классификация процессов комплексного локального деформирования [Текст] / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // [Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=923413). 2010. [№ 6](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=923413&selid=15512341). С. 85-89.

5. Голенков, В.А. Анализ видов упрочняющей обработки пластическим деформированием [Текст] / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // [Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=935548). 2011. [№ 1](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=935548&selid=16336290). С. 59-62.

6. Голенков, В.А. Наукоемкая технология обработки давлением с комплексным локальным нагружением очага деформации[Текст] / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов // [Наукоемкие технологии в машиностроении](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=978534). 2011. [№ 3](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=978534&selid=17087428). С. 31-37.

7. Голенков, В.А. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях [Текст] / В.А. Голенков С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // [Наноинженерия](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1014338). 2012. [№ 5](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1014338&selid=17691568). С. 18-22.

8. Радченко, С.Ю. Создание градиентных наноструктур в осесимметричных изделиях [Текст] / С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунов // [Мир транспорта и технологических машин](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1197180). 2013. [№ 3 (42)](http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1197180&selid=20655435). С. 67-76.

9. Пат. 2340423 РФ, B 24 B 39/04. Способ получения металлических втулок/[В.А. Голенков](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400302&fam=%D0%93%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2&init=%D0%92+%D0%90), [В.Г. Малинин](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400302&fam=%D0%9C%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%BD&init=%D0%92+%D0%93), [С.Ю. Радченко](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400302&fam=%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE&init=%D0%A1+%D0%AE), [Г.П. Короткий](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400302&fam=%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8%D0%B9&init=%D0%93+%D0%9F), [Д.О. Дорохов](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400302&fam=%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B2&init=%D0%94+%D0%9E); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2007110990/02; заявл. 26.03.2007; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 13.

10. Пат. 2389580 РФ, B21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикро- и нанокристаллическим состоянием материала/[В.А. Голенков](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400303&fam=%D0%93%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2&init=%D0%92+%D0%90), [С.Ю. Радченко](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400303&fam=%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE&init=%D0%A1+%D0%AE), [Д.О. Дорохов](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400303&fam=%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B2&init=%D0%94+%D0%9E); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2008146754/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

11. Пат. 2387514 РФ, B21D 51/02. Способ получения металлических втулок с градиентной субмикро-и нанокристаллической структурой/[В.А. Голенков](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400304&fam=%D0%93%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%B2&init=%D0%92+%D0%90), [С.Ю. Радченко](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400304&fam=%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE&init=%D0%A1+%D0%AE), [Д.О. Дорохов](http://elibrary.ru/author_items.asp?refid=149400304&fam=%D0%94%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%B2&init=%D0%94+%D0%9E); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ОрелГТУ». № 2008146756/02; заявл. 26.11.2008; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

12. Пат. 2462327 РФ, МПК B21H1/22. Способ получения металлических втулок с градиентно-упрочнённой структурой / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, И.М. Грядунов (RU). - №2010153917/02; Заявлено 27.12.2010; Опубл. 27.09.2012, Бюд. №27.

13. Джонсон, И., Лион., Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Пер. с англ. М.:Мир, 1981. 516 с.

14. Браславский ,В.М. Технология обкатки крупных деталей роликами М.: Машиностроение, 1975 г. – 160 с.

15. Адлер, Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1970. 280 с.

16. Рыков, В.В., Иткин В. Ю. Математическая статистика и планирование эксперимента. М.:Российский государственный ун-т нефти и газа им. И. М. Губкина, 2008. 210 с.

**Радченко Сергей Юрьевич,** д-р.техн.наук, профессор, проректор ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г.Орел; e-mail: [sur@ostu.ru](mailto:sur@ostu.ru).

**Дорохов Даниил Олегович,** канд.техн.наук, доцент ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г.Мценск;

e-mail: [ddostu@mail.ru](mailto:ddostu@mail.ru),

**Грядунов Игорь Михайлович,** канд.техн.наук, старший преподаватель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г.Орел; e-mail: [sapr@ostu.ru](mailto:sapr@ostu.ru).

**Кисловский Александр Алексеевич ,** аспирант ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», г.Мценск;e-mail: [thethe99@mail.ru](mailto:thethe99@mail.ru),