

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.891: 519.242.7

Чукин М.В., Рааб А.Г., Семенов В.И., Асланян И.Р., Рааб Г.И.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ПРОЦЕССЕ ВОЛОЧЕНИЯ СО СДВИГОМ

С использованием компьютерного моделирования в среде пакета прикладных программ «DEFORM-3D» проведен виртуальный полный факторный эксперимент процесса волочения со сдвигом, в ходе которого выполнена оценка влияния независимых параметров (скорость волочения, скорость вращения фильеры, угол волоки и фактор трения) на величину интенсивности деформации. В результате эксперимента получено уравнение регрессии и определены наиболее значимые индивидуальные факторы и их взаимные сочетания, влияющие на параметр отклика. Кроме того, приведены сравнительные результаты процессов обычного волочения и волочения со сдвигом. Показана более высокая эффективность процесса волочения со сдвигом с точки зрения интенсивности деформации.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, волочение со сдвигом, виртуальный полный факторный эксперимент, матрица планирования, интенсивность деформации.

With the help of computer simulation in the software «DEFORM-3D» there was performed virtual complete factor experiment of the shear drawing process, in its course there was performed assessment of influence of independent parameters (drawing speed, die rotation speed, die angle and friction factor) on the strain intensity. As a result of the experiment there was derived a regression equation and were determined the most significant individual factors and their combination, which influence the response parameters. Also, there were represented the comparative results of processes of conventional drawing and shear drawing. There was demonstrated a higher efficiency of shear drawing process from the point of view of strain intensity.

**Keywords:** computer simulation, shear drawing, virtual complete factor experiment, planning matrix, deformation intensity.

### Введение

В настоящее время наблюдается интерес к исследованиям в области повышения прочности металлов за счет измельчения структуры до субмикроструктурного (СМК) размера путем обработки в условиях интенсивной пластической деформации (ИПД) [1]. Одним из методов ИПД является равноканальное угловое пресовывание (РКУП) [2, 3] и его развитие – РКУП-Conform [4], разработанный для получения длинномерных заготовок с объемной СМК структурой и позволяющий создать предпосылки для практической реализации процесса ИПД.

Техпроцесс, основанный на измельчении структуры методом ИПД и реализованный на установке РКУП-Conform, является эффективным способом повышения прочности металлов и сплавов. Однако он имеет ряд недостатков:

1) многоцикловая обработка для получения высоких значений накопленной деформации обрабатываемого материала;

2) получение длинномерных прутков квадратного сечения;

3) введение дополнительной постдеформационной обработки, например волочения для получения прутков круглого сечения.

Для устранения перечисленных недостатков предложен способ волочения со сдвигом. Деформация, сопровождаемая изменением механических свойств металла, реализуется за счет волочения и вращения эксцентриковой волоки, что обеспечивает дополнительную деформацию сдвига [5].

Описание поведения и прогнозирования процесса волочения со сдвигом затруднено отсутствием доста-

точного количества натуральных экспериментов, так как работа над физическим экспериментом является довольно затратной как по времени, так и по капитальным вложениям.

В научной и практической деятельности значительное место занимают численные методы изучения сложных процессов, включающие компьютерное моделирование с использованием новейших программных продуктов. Эффективность использования методов моделирования и решения инженерных задач значительно возрастают, если на стадии, предшествующей проектированию реального технологического процесса, создаются условия для оценки значимости наиболее важных параметров.

Применение математических методов является одним из наиболее рациональных подходов к решению задач по оценке эффективности нестандартных процессов обработки давлением. В связи с этим представляется целесообразным проведение численного моделирования с использованием планирования виртуального полного факторного эксперимента (ПФЭ) [6].

Достоинством ПФЭ является способность описания процесса при полном соблюдении алгоритма физического эксперимента с учетом установленных допущений. ПФЭ наиболее легко реализуем среди многочисленных методов физического эксперимента. При использовании ПФЭ целью является получение линейной математической модели процесса, которая позволит определиться с дальнейшей стратегией проведения реального эксперимента.

Таким образом, целью моделирования является проведение виртуального процесса волочения со сдвигом с использованием ПФЭ и выявление наибо-

лее эффективных условий для получения длинномерных СМК полуфабрикатов.

**Методика исследования**

Для получения возможно более полной информации об изучаемых зависимостях при выполнении моделирования авторы воспользовались ПФЭ. Планирование эксперимента – это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для получения математической модели процесса [7]. При этом важно учитывать следующее: стремление к минимизации числа опытов; одновременное варьирование всех переменных, определяющих процесс; выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов. Перед проведением планирования натурального эксперимента необходимо собрать дополнительную информацию об исследуемом объекте, для получения которой используются навыки и знания, которые получены ранее в предыдущих исследованиях или описаны в литературе [8].

Планирование эксперимента было проведено по способу получения длинномерных прутков круглого сечения из низкоуглеродистой стали. Устройство волочения со сдвигом состоит из двух эксцентриковых волок, одна из которых вращается [5]. Схема представлена на рис. 1.

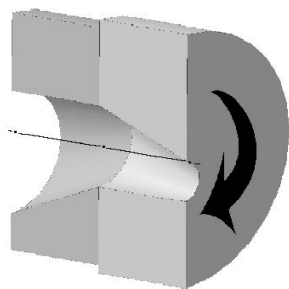


Рис. 1. Фильеры для волочения со сдвигом

Объект исследования – низкоуглеродистая сталь с содержанием углерода 0.1%, реологические свойства которой были заложены при разработке численной модели [9].

Для реализации процедуры численного моделирования использовали стандартный пакет прикладных программ (ППП) «DEFORM-3D».

С целью проведения моделирования и факторного эксперимента в ППП «DEFORM-3D» предварительно были созданы объемные модели фильер в программном продукте «Компас-3D» с различными углами рабочей части.

**Принятые допущения**

1) материал заготовки в исходном состоянии является изотропным и в нем отсутствуют начальные напряжения и деформации;

2) температуру среды деформирования принимали равной 20°C;

3) инструмент является абсолютно жестким, и учет геометрии инструмента производится автоматически;

4) материал исходной заготовки принимали пластичным;

5) для моделирования было выбрано 100 шагов, учитывающих полное прохождение заготовки в фильерах и получение стабильного результата;

6) заготовка разбита на 43553 трапецидальных элементов.

На стадии подготовки задачи моделирования считаем, что наиболее значимыми факторами, влияющими на интенсивность деформации при волочении со сдвигом при комнатной температуре, являются угол фильеры, скорость волочения, скорость вращения фильеры вокруг оси и трибологические параметры контакта заготовки с инструментом. В связи с этим решено провести виртуальный ПФЭ с использованием двухуровневой модели с четырьмя неизвестными по числу переменных факторов с последующей формализацией полученных результатов в виде уравнения регрессии и оптимизацией выбранных факторов.

Таким образом, в качестве независимых переменных в процессе волочения со сдвигом, характеризующих выполнение процесса и его эффективность, с точки зрения интенсивности деформации выбрали скорость волочения проволоки  $V (X_1)$ , скорость вращения фильеры  $\omega (X_2)$ , угол волокна  $\alpha (X_3)$ , и фактор трения  $f_{mp} (X_4)$ . Параметром отклика (или зависимой переменной) определили интенсивность деформации материала  $(Y)$ .

Факторы варьировали на двух уровнях. Интервалы варьирования переменных факторов и их значения в натуральном масштабе указаны в табл. 1.

Таблица 1

**Уровни факторов**

Факторы	$X_1$ ( $V, м/мин$ )	$X_2$ ( $\omega, мин^{-1}$ )	$X_3$ ( $\alpha, град$ )	$X_4$ ( $f_{mp}$ )
Основной уровень ( $X_i$ )	20	350	15	0,50
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	10	50	5	0,25
Верхний уровень ( $x_i = 1$ )	30	600	20	1
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	10	100	10	0

Количество опытов  $N$  определяли по количеству факторов  $k$  в соответствии с выражением

$$N = 2^k = 2^4 = 16. \tag{1}$$

Требуется определить такие значения  $V, \omega, \alpha, f_{mp}$ , при которых будет обеспечено получение интенсивности деформации  $\varepsilon$  в диапазоне значений от 1 до 3 ( $1 \leq \varepsilon \leq 3$ ).

**Результаты эксперимента и их обсуждение**

Математическая модель после реализации опытов полного факторного эксперимента имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + \dots + b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \tag{2}$$

где  $b_i$  – коэффициенты регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели построили расширенную матрицу планирования и результатов опытов (табл. 2).

Таблица 2

Расширенная матрица плана 2<sup>4</sup> и результатов опыта

Номер опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	y
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,30
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	0,70
3	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	0,90
4	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	0,50
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	0,50
6	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	0,90
7	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	0,60
8	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	0,70
9	+	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	0,40
10	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	1,50
11	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	1,10
12	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	1,20
13	+	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	0,70
14	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	0,90
15	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	1,30
16	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	1,00

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \tag{3}$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, 16$ .

На основании вычислений получили следующий общий вид линейного уравнения регрессии:

$$y = 0,825X_0 + 0,0125X_1 + 0,2X_2 - 0,1125X_3 - 0,075X_4 - 0,1625X_1X_2 - 0,05X_1X_3 + 0,175X_1X_4 - 0,0125X_2X_3 + 0,05X_2X_4 - 0,0375X_3X_4 + 0,05X_1X_2X_3 - 0,0875X_1X_2X_4 + 0,0X_1X_3X_4 + 0,0625X_2X_3X_4 + 0,0X_1X_2X_3X_4. \tag{4}$$

В результате реализации двухуровневой четырехфакторной модели ПФЭ и определения статистической значимости каждого из 16 коэффициентов [10] уравнение регрессии (4) приняло вид

$$y = 0,825X_0 + 0,2X_2 - 0,1125X_3 - 0,075X_4 + 0,1025X_1X_2 + 0,175X_1X_4 - 0,0875X_1X_2X_4 + 0,0625X_2X_3X_4. \tag{5}$$

При этом гипотеза об адекватности математической модели (5) по критерию Фишера [6] при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Из уравнения (5) видно, что наиболее значимое влияние на величину интенсивности деформации оказывают скорость вращения фильеры, угол волоки и фактор трения, а также совместное взаимодействие скорости волочения и скорости вращения фильеры; скорости волочения и фактора трения; скорости волочения, скорости вращения фильеры и фактора трения; скорости вращения фильеры, угла волоки и фак-

тора трения. Совместное взаимодействие остальных факторов оказывает незначительное влияние на величину интенсивности деформации. Установлено, что с увеличением скорости вращения фильеры и уменьшением угла волоки и фактора трения интенсивность деформации возрастает. Также параметр отклика возрастает при одновременном увеличении скорости волочения и скорости вращения фильеры. Более существенное влияние на интенсивность деформации оказывает совместное увеличение скорости волочения и фактора трения. В гораздо меньшей степени прогнозируется влияние на интенсивность деформации одновременно трех из рассмотренных в данной постановке независимых переменных: скорости волочения, скорости вращения фильеры и фактора трения, а также скорости вращения фильеры, угла волоки и фактора трения. При этом их суммарное действие разнонаправлено. Поэтому сложные взаимодействия следует анализировать отдельно и с привязкой к конкретным условиям эксплуатации многокомпонентной системы.

Из уравнения (5) видно, что сама по себе скорость волочения оказывает слабое влияние на интенсивность деформации, но в сочетании со скоростью вращения фильеры, углом волоки и контактными условиями в пластическом трибосопряжении может эффективно повышать интенсивность деформации.

Отсюда следует, что максимальную величину интенсивности деформации можно получить при оптимальном сочетании скорости волочения с другими независимыми параметрами, рассмотренными в данном исследовании.

Для более наглядного анализа полученной математической модели построили диаграмму влияния факторов на интенсивность деформации (рис. 2).

Таблица 3

Крутое восхождение

Факторы	X <sub>1</sub> (скорость волочения, м/мин)	X <sub>2</sub> (скорость вращения волоки, мин <sup>-1</sup> )	X <sub>3</sub> (угол воло- ки, град)	X <sub>4</sub> (фактор трения)	у (интенсив- ность де- формации)
b <sub>i</sub>	0,0125	0,20	- 0,1125	- 0,075	
b <sub>i</sub> ΔX <sub>i</sub>	5*	10,00	- 0,5625	- 0,019	
Шаг	10	20	- 1,125	- 0,038	
Шаг после округления	10	50	- 2,0	- 0,05	
Основной уровень (X <sub>i</sub> )	20	350	15	0,50	
Мысленный опыт	15	100	20	0,45	
Реализованный опыт	15	150	18	0,40	0,90
Мысленный опыт	15	200	16	0,35	
Мысленный опыт	15	250	14	0,30	
Реализованный опыт	15	300	12	0,25	0,70
Мысленный опыт	15	350	10	0,20	
Мысленный опыт	15	400	20	0,15	
Реализованный опыт	15	300	18	0,10	1,20
Реализованный опыт	15	500	16	0,12	1,60
Мысленный опыт	15	550	14	0,15	
Реализованный опыт	15	600	12	0,10	0,70
Мысленный опыт	15	600	10	0,05	

\*Значение b<sub>i</sub>ΔX<sub>i</sub> для X<sub>1</sub> (скорость волочения) установлено априорно из-за необходимости синхронизации данного фактора с другими независимыми значимыми параметрами, принятыми к рассмотрению. При этом шаг выбран произвольно из технологических соображений.

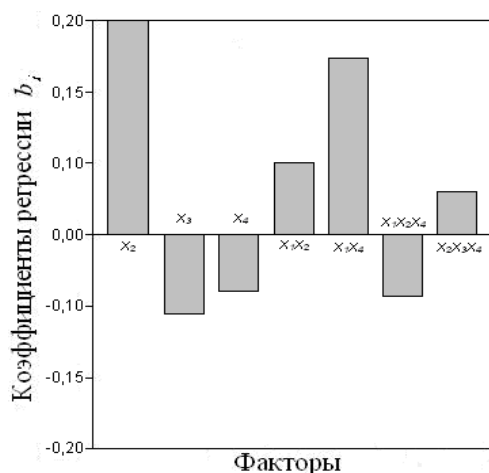


Рис. 2. Влияние значимых факторов и их взаимодействий: отрицательные значения – при уменьшении фактора увеличивается параметр отклика; положительные значения – при увеличении фактора увеличивается параметр отклика

Представляет практический интерес решение оптимизационной задачи по определению фактических значений независимых параметров, рассмотренных в виртуальном эксперименте численного моделирования, обеспечивающем максимальное значение интенсивности деформации при волочении со сдвигом. Эту задачу решали методом «крутого восхождения» [6].

Шаги в изменении факторов рассчитывали в натуральном масштабе. Для этого вначале определили произведения коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования факторов, т.е. b<sub>i</sub>ΔX<sub>i</sub>, затем пропорционально этим произведениям назначили шаги. Последовательность реализации этапов крутого восхождения представлены в табл. 3.

Некоторые из мысленных опытов реализовали в компьютерной модели (табл. 4). Планирование эксперимента с использованием метода крутого восхождения показало, что в рассматриваемых условиях интенсивность деформации будет наибольшей при высокой скорости вращения фильеры ( $\omega \approx 500 \text{ мин}^{-1}$ ), малом угле волоки ( $\alpha \approx 16^\circ$ ) и снижающемся факторе трения ( $f_{mp} \rightarrow \text{min}$ ). При этом осевая скорость волочения (V), из-за малого влияния на интенсивность деформации в качестве индивидуального параметра, была принята постоянной и равнялась 15 м/мин.

В рамках поставленной задачи исследования нами получены оптимизированные численные значения варьируемых параметров, соответствующие требуемому значению интенсивности деформации ( $\epsilon \geq 1,5$ ).

Моделирование процесса волочения со сдвигом в среде «DEFORM 3D» было проведено со следующими параметрами:

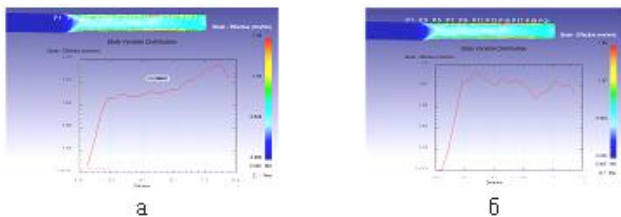
Фактор трения (по Зибелю)	0,12
Угол волоки, град	16
Скорость волочения, м/мин	15
Скорость вращения фильеры, мин <sup>-1</sup>	500

Ниже представлены результаты численного моделирования по оптимизированным значениям, полученным в процессе проведения виртуального ПФЭ.

Анализ деформированного состояния заготовки после волочения со сдвигом показывает, что наиболь-



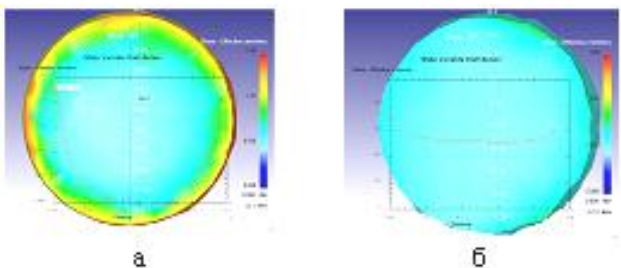
шее значение  $\varepsilon$  достигается на поверхности заготовки (рис. 3, б), так как там происходит наибольшая деформация металла, связанная с геометрией волок и вращением одной из них.



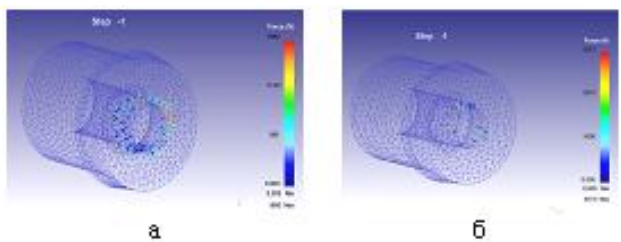
**Рис. 3. Картина распределения интенсивности деформации в процессе волочения со сдвигом: а – в продольном сечении на оси; б – в продольном сечении на поверхности**

Для оценки величин интенсивности деформаций за один цикл обработки был проведен анализ процессов волочения со сдвигом и обычного волочения.

Из распределения интенсивностей деформаций (рис. 4) видно, что за один цикл волочения со сдвигом достигаются большие значения, чем за один цикл обычного волочения.



**Рис. 4. Картина интенсивности деформации в поперечном сечении: а – процесс волочения со сдвигом; б – обычное волочение**



**Рис. 5. Распределение нормальных сил на деформирующем инструменте: а – волочение со сдвигом; б – обычное волочение**

Исследование нормальных сил на инструменте показывает что, при вращении волоки силы, воздействующие на инструмент, снижаются почти в 2 раза, что расширяет номенклатуру сталей для изготовления инструмента и может способствовать удешевлению процесса (рис. 5).

### Выводы

1. Виртуальный ПФЭ методом крутого восхождения в процессе численного моделирования позволил определить оптимальные числовые значения независимых параметров, обеспечивающих максимальную величину интенсивности деформации при комнатной температуре. Для получения  $\varepsilon \approx 1,6$  необходимо обеспечить скорость вращения волоки  $\omega \approx 500 \text{ мин}^{-1}$ , угол волоки  $\alpha \approx 16^\circ$  и фактор трения  $f_{mp} \approx 0,12$  при скорости волочения  $V = 15 \text{ м/мин}$ .

2. Сравнительный анализ процессов волочения со сдвигом и обычного волочения стали 10 при комнатной температуре позволяет снизить силы волочения почти в 2 раза, повысить максимальные значения интенсивности накопленных деформаций с 0,5 до 1,6 и, кроме того, снизить нормальные силы на инструменте в 1.8 раза.

*Работа выполнена в рамках проекта № 11-08-97038-р\_поволжье\_а, поддержанного РФФИ и АН РБ.*

### Список литературы

1. Валиев Р.З. Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.
2. Процессы пластического структурообразования металлов / Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др. Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
3. Segal V.M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion // Mater. Sci. Eng. A. 2004; V. 386. P. 269-276
4. Рааб Г.И., Валиев Р.З. Равноканальное угловое прессование длинномерных заготовок // Цветная металлургия. 2000. №5. С. 50-53.
5. Пат. 2347633 Российская Федерация. Способ получения ультрамелкозернистых полуфабрикатов волочением со сдвигом / Рааб Г.И., Рааб А.Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО УГАТУ. Опубл. 27.02.2009.
6. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
7. Адлер Ю.П. Предпланирование эксперимента. М.: Знание, 1978. 72 с.
8. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1969. 158 с.
9. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. М.: Машиностроение. 1989. 640 с.
10. Славутский Л.А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента: учеб. пособие. Чебоксары: Изд-во ЧГУ, 2006. 200 с.

### Bibliography

1. Valiev R.Z., Alexandrov I.V., «Bulk Nanostructured Metallic Materials: Production, Structure and Properties», 2007, Akademkniga Pub., Moscow, 398 p., ill.
2. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I. «Plastic structure formation processes of metals», 1994, Minsk: Science and Technology, 232 p.
3. Segal V.M. Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion // Mater. Sci. Eng. A. 2004; V. 386. P. 269-276
4. Raab G.I., Valiev R.Z. Equal channel angular pressing of long workpieces. Non-ferrous metals-2000ю № 5, p. 50-53
5. Patent № 2347633 Method of ultrafine semi-drawing with a shift. Published 27/02/2009 Authors: Raab G.I., Raab A.G., Patent holder: USATU
6. Novick F.S., Arsov J.B. Process optimization technology metals by planning of experiments.-M.Mashinostroenie, Sofia: Technique. 1980. 304 p.
7. Adler J.P. Design of experiments. M.: Znanie. 1978. 72 p.
8. Adler J.P. Introduction to design of experiments. Moscow: Metallurgy. 1969. 158p.
9. Database of steels and alloys / V.G. Sorokin, A.V. Volosnikova, S.A. Vyatkin etc. Mashinostroenie. 1989. 640 p.
10. Slavutsky L.A. Fundamentals of data acquisition and experimental design: the manual. Cheboksary publ. ChSU, 2006. 200 p.