

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.778.1.014-426-022.532

Чукин М.В., Корчунов А.Г., Голубчик Э.М., Полякова М.А., Гулин А.Е.

## АНАЛИЗ МЕТОДА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЯ ПРОВОЛОКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ

На основе анализа многооперационных технологических процессов разработана классификация наследственных связей в технологиях деформационного наноструктурирования углеродистых сталей. Приведен общий механизм оценки технологического наследования в процессах деформационного наноструктурирования. Для оценки характера изменения структуры и свойств углеродистой проволоки в ходе разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования формализована количественная степень технологической наследственности при пооперационной обработке в виде коэффициента технологического наследования. Использование концепции технологического наследования позволяет оценить эффективность применения метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки в действующих промышленных технологиях.

**Ключевые слова:** технологическое наследование, многооперационные процессы, наследственные связи, алгоритм учета технологического наследования, метод непрерывного деформационного наноструктурирования.

The classification of hereditary connections in carbon steel deformation nanostructuring technologies is developed on the basis of analysis of multioperation technological processes. General mechanism of technological inheritance estimation in deformation nanostructuring processes is given. For evaluating the change nature in carbonaceous wire structure and properties in the course of the developed method of continuous deformation nanostructuring the quantitative degree of technological heredity is formalized with the per operation working in the form of the coefficient of technological inheritance. The use of technological inheritance concept makes it possible to estimate the application effectiveness of method of continuous deformation nanostructuring wire in the acting industrial technologies.

**Keywords:** technological inheritance, multioperation processes, hereditary connections, calculation algorithm of technological inheritance, method of continuous deformation nanostructuring.

Современные тенденции развития ведущих отраслей отечественной экономики указывают на то, что в кратко- и среднесрочной перспективах устойчивым спросом будет пользоваться продукция, полученная с применением наукоемких технологий. Новым и приоритетным направлением развития как отечественной, так и зарубежной науки и техники является индустрия наносистем. При этом малоисследованными являются процессы деформационного наноструктурирования длинномерных металлоизделий из углеродистых сталей, в связи с чем они требуют всестороннего изучения, осмысления и глубокого анализа возможностей применения как в научном, так и практическом аспектах.

Как правило, процессы деформационного наноструктурирования сталей относятся к так называемым конечным переделам металлургической отрасли. Они зачастую связаны с продукцией глубокой степени переработки и подразумевают технологическую многостадийность. При этом следует рассматривать значительное многообразие технологических схем и операций, участвующих в создании конечного металлоизделия с использованием процессов деформационного наноструктурирования, что приводит к необходимости учета значительного числа факторов, которые влияют на процесс формирования требуемого комплекса свойств [1]. Оценку влияния режимов как отдельно взятой технологической операции, так и совокупный вклад смежных операций или всей технологической цепочки на достижение конечных свойств

изделия возможно проводить на основе разрабатываемой учеными ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова» концепции технологического наследования.

Согласно данной концепции в многооперационных технологических процессах признаки (свойства) готовых металлических изделий формируются на протяжении всего процесса обработки и технологически наследуются от предшествующей операции к последующей. В ходе процессов с использованием деформационного наноструктурирования формирование свойств металлических изделий зависит от разнообразных наследственных связей (НС), во многом определяющих характер технологического наследования (рис. 1). Учет НС является одной из основных составляющих концепции технологического наследования.

По влиянию на конечный комплекс свойств изделий следует различать благоприятные и неблагоприятные НС. Потенциальными причинами зарождения неблагоприятных НС являются неравномерность химического состава, микроструктуры и механических свойств исходной заготовки, неравномерность напряженно-деформированного состояния в процессах формоизменения, неоднородность микроструктуры и механических свойств и др. Это может привести к невозможности достижения требуемых значений свойств обрабатываемой заготовки, значительной величине их разброса, а в предельном случае и невозможности осуществления запланированной последовательности обработки.

По чувствительности к технологическим воздействиям при обработке НС можно классифицировать как устойчивые (слабо реагирующие на изменение параметров управления в широких диапазонах) и неустойчивые. По механизму действия можно выделить простые и комплексные НС. Механизм простой НС характеризуется влиянием на свойство только его предыдущего состояния и технологических параметров управления самой операции, определяющих количественное значение технологического наследования по конкретному свойству. Такой механизм свойственен техническому объекту, когда формирование свойства изделий происходит за один рабочий ход.



Рис.1. Наследственные связи в процессах деформационного наноструктурирования сталей

Механизм комплексной НС выражается во влиянии на свойство не только параметров управления текущей операции, но и технологических режимов обработки, формирующих технологическую предысторию. Следует отметить, что в многостадийных процессах деформационного наноструктурирования оба выделенных механизма могут действовать одновременно.

Важную роль на начальных этапах деформационного наноструктурирования играют параметры состояния материала (напряженно-деформированное состояние, микроструктура и др.), формирующиеся под воздействием параметров управления (технологических факторов) процесса обработки и определяющие возможность зарождения неблагоприятных НС. Технологические режимы обработки на этих этапах необходимо ориентировать на получение промежуточной заготовки с необходимыми параметрами состояния с учетом специфики выполнения последующих технологических операций.

Вышеизложенное свидетельствует о необходимости учета неблагоприятных НС при разработке новых и совершенствовании действующих процессов деформационного наноструктурирования с использованием процессов обработки различной физической природы.

Для оценки характера изменчивости свойств металлических изделий в ходе технологического про-

цесса деформационного наноструктурирования формализована количественная степень технологической наследственности при пооперационной обработке в виде коэффициента технологического наследования  $\beta_{ij}$ :

$$\beta_{ij} = \frac{k_{ij}}{k_{i(j-1)}} - 1, \quad (1)$$

где  $k_{ij}$ ,  $k_{i(j-1)}$  - значение свойства изделия после  $j$ -й и  $(j-1)$ -й технологической операции соответственно.

Коэффициент технологического наследования количественно отражает направление изменения и степень передачи свойства от предшествующей операции к последующей, а также чувствительность данного свойства к технологическим воздействиям [2].

Общий механизм оценки технологического наследования в процессах деформационного наноструктурирования представлен на рис. 2.

Первым этапом исследования явления технологического наследования является определение характера и чувствительности структуры и свойств проволоки из углеродистой стали к различным видам технологического воздействия. Количественно это можно оценить через коэффициент технологического наследования. Рассмотрим применение концепции технологического наследования на примере разрабатываемого на кафедре машиностроительных и металлургических технологий МГТУ им. Г.И. Носова метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки.

Перспективным направлением разработки процессов деформационного наноструктурирования является совмещение технологических операций, либо их комбинирование в непрерывную линию. Такой подход также предусматривает многостадийность технологического процесса. Как известно, для создания технологических процессов с совмещенными операциями необходимо выбрать базовую операцию. Поскольку основной свойствообразующей операцией при производстве проволоки является операция волочения, то эта операция была выбрана в качестве базовой для разработки нового непрерывного метода деформационного наноструктурирования. Сущность разработанного непрерывного метода деформационного наноструктурирования состоит в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения волочением, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения (рис. 3). Такая схема деформирования приводит к появлению сдвиговых деформаций, что позволяет получать ультрамелкозернистую структуру в обрабатываемой проволоке [3, 4].

Перспективным направлением разработки процессов деформационного наноструктурирования является совмещение технологических операций, либо их комбинирование в непрерывную линию. Такой подход также предусматривает многостадийность технологического процесса. Как известно, для создания технологических процессов с совмещенными операциями необходимо выбрать базовую операцию. Поскольку основной свойствообразующей операцией при производстве проволоки является операция волочения, то эта операция была выбрана в качестве базовой для разработки нового непрерывного метода деформационного наноструктурирования. Сущность разработанного непрерывного метода деформационного наноструктурирования состоит в одновременном наложении на непрерывно движущуюся проволоку деформации растяжения волочением, деформации изгиба при прохождении через систему роликов и деформации кручения (рис. 3). Такая схема деформирования приводит к появлению сдвиговых деформаций, что позволяет получать ультрамелкозернистую структуру в обрабатываемой проволоке [3, 4].

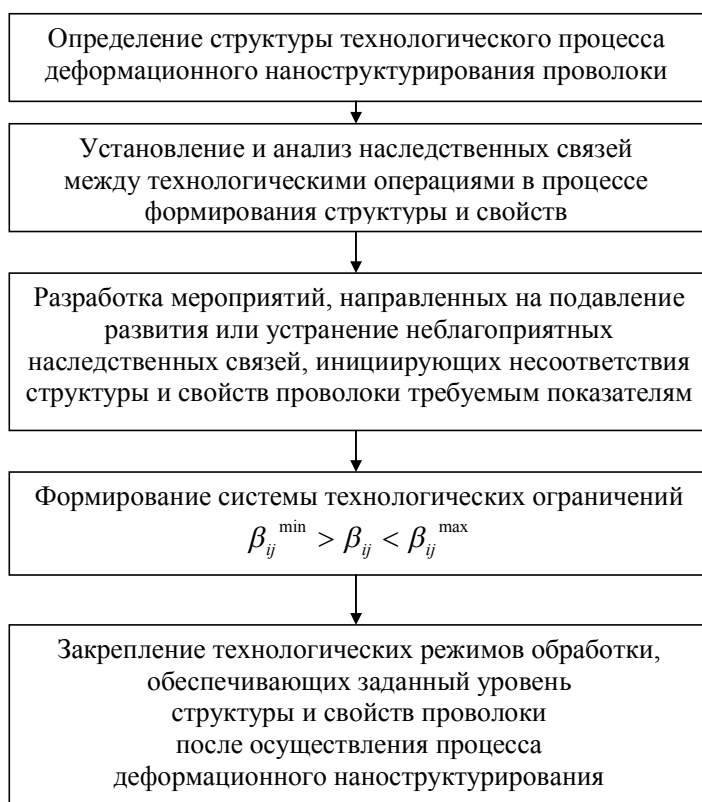


Рис. 2. Алгоритм учета явления технологического наследования при деформационном наноструктурировании проволоки

Преимуществом такой схемы деформирования является возможность использования для ее реализации имеющихся в метизном производстве технических устройств, а значит, ее применимость в действующих технологических процессах производства проволоки. На данный метод получено положительное решение на выдачу патента Российской Федерации.

Однако для оценки эффективности применения данного процесса в действующих промышленных технологиях необходимо провести анализ влияния как каждой отдельной операции, так и совокупности используемых операций волочения, изгиба и кручения на формирование структуры и уровень механических свойств наноструктурированной проволоки с применением концепции «технологического наследования».

Исследование влияния режимов деформационной обработки на формирование структуры и механиче-

ских свойств в ходе разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования проводили на отожженной проволоке из высокоуглеродистой стали с содержанием 0,75% С диаметром 3,05 мм [5-7]. Микроструктура состояла из ферритокарбидной смеси и структурно-свободного феррита, расположенного по границам неравномерных по размеру перлитных колоний. В ходе реализации метода непрерывного деформационного наноструктурирования суммарная степень деформации в обеих проволоках составляла 19,88%, количество оборотов при кручении изменяли до обрыва проволоки после второй по ходу движения проволоки проволоки. Это значение оборотов кручением приняли за 100%. После непрерывного метода деформационного наноструктурирования исследовали механические свойства проволоки: временное сопротивление разрыву  $\sigma_b$  как показатель прочности и относительное сужение  $\psi$  как показатель пластичности. Для полученных значений механических свойств проволоки были рассчитаны коэффициенты технологического наследования по формуле (1).

Результаты измерения механических свойств высокоуглеродистой проволоки после разработанного процесса деформационного наноструктурирования и значения коэффициентов технологического наследования приведены в табл. 1.

Из полученных данных видно, что при степени деформации кручением до 50% значения  $\beta_{ij} < 0$ .

Происходит разупрочнение проволоки до 4% и уменьшение значений относительного сужения на 37% от первоначального значения. Изменение коэффициента технологического наследования для значений относительного сужения происходит более интенсивно и в большей степени. Таким образом, целесообразными режимами обработки стальной высокоуглеродистой проволоки является степень деформации кручением от 50 до 100%, где коэффициент технологического наследования имеет положительные значения  $\beta_{ij} > 0$ . Наиболее эффективным режимом обработки является деформация кручением в 85% от максимального значения.

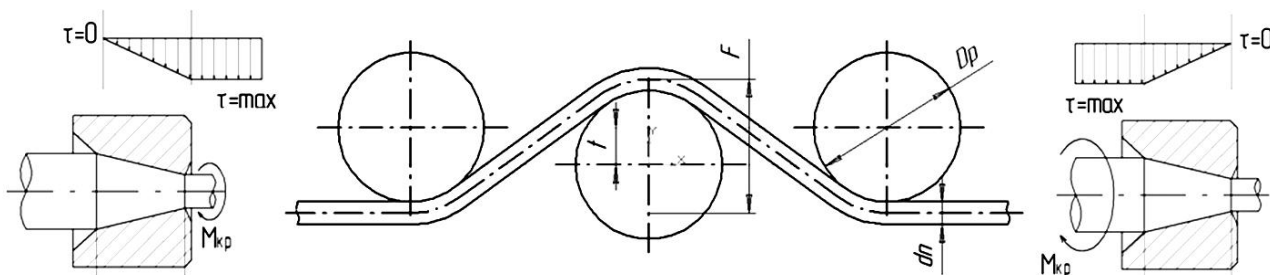


Рис. 3. Принципиальная схема непрерывного метода деформационного наноструктурирования проволоки

Таблица 1

## Механические свойства проволоки и значения коэффициентов технологического наследования

Степень деформации, %	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Относительное сужение $\psi$ , %	Коэффициент технологического наследования для значений «временное сопротивление разрыву» $\beta_\sigma$	Коэффициент технологического наследования для значений «относительное сужение» $\beta_\psi$
0	851,15	8,07		
10	825,20	6,84	-0,030	-0,153
20	820,56	5,06	-0,036	-0,373
30	896,54	9,30	0,053	0,152
40	866,29	6,13	0,018	-0,241
50	866,99	11,72	0,019	0,452
60	879,04	11,38	0,033	0,410
70	942,60	14,45	0,107	0,791
85	954,37	14,79	0,121	0,833
95	879,89	10,69	0,034	0,324

Одним из основных показателей разработанного метода непрерывного деформационного наноструктурирования является измельчение микроструктурных составляющих. В качестве изучаемых параметров микроструктуры были выбраны межпластиночное расстояние  $h_s$ , толщина цементитных пластин  $h_c$ , толщина ферритных пластин  $h_f$  и величина перлитных колоний. Для оценки эффективности метода непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки были рассчитаны коэффициенты технологического наследования для выбранных микроструктурных составляющих при различных режимах деформации кручением на различных участках поперечного сечения обработанной проволоки (табл. 2 и 3).

С увеличением степени деформации кручением значения коэффициента технологического наследования  $\beta$  для всех микроструктурных параметров понижается монотонно и прямолинейно. С точки зрения получения более дисперсной структуры целесообразно использовать режимы с максимальными значениями степени деформации кручением.

С другой стороны, величина коэффициента технологического наследования зависит от суммарной деформации (суммарной степени обжатия при волочении и степени деформации кручением). Чем меньше величина суммарного обжатия при волочении, тем большее влияние оказывает деформация кручением на уменьшение величины перлитных колоний. Таким образом, при минимальном суммарном обжатии 12,7% значения коэффициента  $\beta$  при степени деформации 80% в два раза больше, чем при степени деформации кручением 30%. При больших значениях суммарного обжатия при воло-

чении влияние деформации кручением на величину параметров микроструктуры проволоки снижается и при максимальном значении суммарной степени обжатия при волочении деформация кручением не оказывает влияния на изменение параметров микроструктуры.

Таблица 2

## Значения коэффициентов технологического наследования для параметров микроструктуры высокоуглеродистой проволоки

Степень деформации, %	Значения коэффициента технологического наследования					
	Центральная область проволоки			Поверхность проволоки		
	для толщины цементитных пластин $\beta_c$	для толщины ферритных пластин $\beta_f$	для межпластиночного расстояния $\beta_s$	для толщины цементитных пластин $\beta_c$	для толщины ферритных пластин $\beta_f$	для межпластиночного расстояния $\beta_s$
10	-0,028	-0,019	-0,094	0,250	0,380	0,199
50	-0,062	-0,023	-0,114	0,205	0,328	0,163
60	-0,094	-0,049	-0,121	0,129	0,255	0,143
70	-0,126	-0,059	-0,139	0,122	0,194	0,108
95	-0,137	-0,070	-0,156	0,127	0,231	0,085

Как видно из полученных данных, значения критерия технологического наследования для исследованных механических свойств проволоки после метода непрерывного деформационного наноструктурирования носят немонокотный характер. Это объясняется тем, что при небольших степенях деформации кручением происходит разупрочнение и снижение пластических свойств обрабатываемой проволоки. При увеличении степени деформации кручением от 20 до 85% от максимального значения происходит увеличение как прочностных, так и пластических свойств обрабатываемой проволоки. При степени деформации кручением 95% уровень механических свойств снова снижается и, соответственно, уменьшаются значения коэффициента технологического наследования. Уменьшение значений критерия технологического наследования микроструктурных параметров как для поверхности, так и для центральной области проволоки, соответствующее уменьшению величины микроструктурных параметров, происходит линейно и монотонно во всем диапазоне принятых степеней деформации кручением. Из полученных данных следует, что наиболее эффективным режимом деформационного наноструктурирования проволоки разработанным методом с целью получения повышенных механических свойств и дисперсности микроструктурных составляющих является деформация кручением в диапазоне 75–80% от максимального значения при суммарном обжатии в волоках 20%.



Таблица 3

Величина коэффициентов технологического наследования для значений величины перлитных колоний при различных режимах обработки проволоки

Степень деформации кручением, %	Степень деформации при волочении проволоки, %		Конечный диаметр проволоки d, мм	Величина перлитных колоний, мкм		Коэффициент технологического наследования для значений величины перлитных колоний	
	в первой по ходу движения проволоки волоке $\varepsilon_1$	во второй по ходу движения проволоки волоке $\varepsilon_2$		в центре	на поверхности	в центральной области проволоки $\beta_{центр}$	на поверхности проволоки $\beta_{поверхность}$
30	0	12,7	2,85	17,227	49,112	-0,605	-0,240
80	0	12,7	2,85	17,302	33,409	-0,603	-0,483
30	0	18,7	2,75	11,907	23,061	-0,727	-0,643
80	0	18,7	2,75	10,887	13,784	-0,750	-0,787
30	18,7	12	2,58	13,003	16,401	-0,702	-0,746
80	18,7	12	2,58	11,942	11,103	-0,726	-0,828
30	18,7	20,6	2,45	8,115	10,647	-0,814	-0,835
80	18,7	20,6	2,45	7,268	13,116	-0,833	-0,797

Таким образом, исследуемый процесс непрерывного деформационного наноструктурирования проволоки позволяет повышать комплекс ее механических свойств. Показатели эффективности процесса (упрочнение, увеличение значения относительного сужения, уменьшение параметров микроструктуры) чувствительны к единичным обжатам в волоках и степени деформации кручением в различной степени в зависимости от соотношения величин деформации. Обработка проволоки должна осуществляться таким образом, чтобы использование одного вида деформации не только не исключало целесообразность использования другого вида деформации, а, наоборот, способствовало взаимному усилению влияния на выбранные показатели эффективности процесса.

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (договор 13.G25.31.0061), программы стратегического развития университета на 2012–2016 гг. (конкурсная поддержка Минобрнауки РФ программ стратегического развития ГОУ ВПО), а также гранта в форме субсидии на поддержку научных исследований (соглашение №14.B37.21.0068).

#### Список литературы

1. Целевые функции взаимосвязи механических свойств и структурных параметров конструкционных наноструктурированных сталей / Корчунов А.Г., Пивоварова К.Г., Лысенин А.В., Гулин А.Е. // Обработка сплошных и слоистых материалов: сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 37. С. 88-95.
2. Корчунов А.Г. Моделирование трансформации показателей качества металлических изделий в процессах обработки // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. № 1. С. 76-78.

3. Полякова М.А., Голубчик Э.М., Гулин А.Е. Разработка непрерывного метода деформационного наноструктурирования проволоки // Обработка сплошных и слоистых материалов: сб. науч. тр./ под ред. М. В. Чукина. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Вып. 37. С. 39-45.
4. Гулин А.Е. Проектирование метода деформационного наноструктурирования проволоки. VIII Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов», Москва, 15-18 ноября 2011 г. Москва: ИМЕТ РАН, 2011. С. 651-653.
5. Полякова М.А., Голубчик Э.М., Гулин А.Е. Влияние схемы деформирования на формирование ультрамелкозернистой структуры углеродистых сталей. IV международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов», Москва, 25-28 октября 2011 г. Москва: ИМЕТ РАН, 2011. С. 201-203.
6. Гулин А.Е., Никитенко О.А., Полякова М.А. Влияние знакопеременной деформации на микроструктуру и механические свойства проволоки // Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов: материалы XXI Уральской школы металлургов-термистов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. С. 242-243.
7. Влияние знакопеременной деформации на формирование ультрамелкозернистой структуры и механические свойства высокоуглеродистой проволоки / Полякова М.А., Гулин А.Е., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А. // Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'12): труды междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. С. 278-282.

#### Bibliography

1. Korchnunov A.G., Pivovarova K.G., Lysenin A.V., Guln A.E. Objective functions of relationship between mechanical properties and structural parameters of construction nanostructured steels / Collection of scientific papers «Processing of solid and laminar materials». Under the editorship of M.V. Chukin. Magnitogorsk: Publishing house of Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov, 2011. Issue 37. P. 88-95.
2. Korchnunov A.G. Transformation simulation of metalwale quality indices in the working processes / Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov. 2009. №1. P. 76-78.
3. Polyakova M.A., Golubchik E.M., Guln A.E. Development of continuous method of wire nano-structuring deformation / Collection of scientific papers «Processing of solid and laminar materials». Under the editorship of M.V. Chukin. Magnitogorsk: Publishing house of Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov, 2011. Issue 37. Pp. 39-45.
4. Guln A.E. Development of the method of deformation wire nanostructuring. VIII Russian annual conference of young research scientists and postgraduate students «Physics, chemistry and technology of inorganic materials». Moscow. November 15-18, 2011. / Collection of papers. M: IMET Russian Academy of Sciences. 2011. P. 651-653.
5. Polyakova M.A., Golubchik E.M., Guln A.E. Influence of the deformation diagram on the formation the carbon steels ultrafine-grain structure / IV international conference «Deformation and destruction of materials and nanomaterials». Moscow. 25-28 October, 2011 / Collection of papers. M: IMET Russian Academy of Sciences. 2011. P. 201-203.
6. Guln A.E., Nikitenko O.A., Polyakova M.A. Influence of alternating strain on the wire microstructure and mechanical properties / The vital problems of steels and alloys physical metallurgical science: Collection of papers XXI Ural school of metallographer-heat specialists. Magnitogorsk: Publishing house of Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov. 2012. P. 242-243.
7. Polyakova M.A., Guln A.E., Efimova Yu.Yu. Influence of alternating strain on formation of highly carbonaceous wire ultrafine-grain structure and mechanical properties / Nano-technologies of functional materials (NFM'2012). Collection of papers of the international scientific and technology conference. SPb: Publishing house of Polytechnic university. 2012. P. 278-282.