



УДК 624.072

ВЛИЯНИЕ МЕХАНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

ДУЙШЕНАЛИЕВ Т.Б., ИСИРАИЛОВ Т.И., РАБИДИНОВА Ж.Д.

*Кыргызский государственный технический
университет им. И.Раззакова*
izvestiya@ktu.aknet.kg

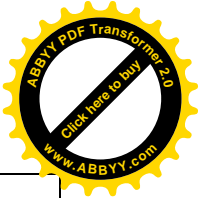
Даются режимы механо-термической обработки высокопрочной стальной проволоки. Показано, что одновременное воздействие силовой вытяжки и нагрева способствует релаксации пиковых напряжений по сечению проволоки. Создающее за счет деформационного старения препятствие для движения дислокаций повышает упругие свойства и релаксационную стойкость проволочной арматуры.

Высокопрочная арматурная проволока широко применяется для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций гражданских, промышленных транспортных и специальных сооружений, а также для производства арматурных канатов. Она изготавливается из патентованной катанки на волочильных станах. При этом проволока сильно упрочняется, но ее пластические свойства значительно снижаются. Кроме того, волочение вызывает большие остаточные напряжения в проволоке - растяжение в наружном слое и сжатие в среднем, достигающие 240-450 МПа [9], которые снижают выносливость проволоки [7], а также ее коррозионную стойкость [1]. Для снижения остаточных напряжений и улучшения пластических свойств высокопрочную проволоку после волочения подвергают низкотемпературному отпуску, который производят путем нагрева ее до температуры 300-450°C, в основном, в расплавах солей или металлов.

Исследованиями свойств арматурной высокопрочной проволоки и канатов было установлено, что низкотемпературный отпуск повышает их упруго-пластические характеристики и почти не оказывает влияния на прочностные и реологические свойства [9].

В настоящее время действующими нормативными документами степень предварительного напряжения проволочной арматуры при изготовлении железобетонных конструкций ограничена условным пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и не превышает $0,75 \sigma_u$ [2]. Это обусловлено тем, что выпускаемая проволочная арматура имеет гарантированный условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, равный 80% ее временного сопротивления σ_u . В результате многочисленных опытов было установлено, что степень предварительного напряжения для такой арматуры нецелесообразно принимать более $0,75 \sigma_u$, т.к. при этом значительно возрастают потери напряжения от релаксации. Поэтому в бывшем СССР, а также в ряде стран дальнего зарубежья проводились исследования с целью изыскания путей повышения упруго-пластических свойств и реологической стойкости арматурной стали. В этом направлении наиболее перспективным оказался путь механо-термической обработки арматурной стали - стабилизация.

Исследовались свойства проволоки классов Вр-П и В-П диаметром 5мм, изготовленные на Харцызском сталепроволочно-канатном заводе (Украина). В качестве исходной стали использовалась катанка Макеевского металлургического завода (табл.1). При обработке катанка подвергалась патентованию открытым нагревом до 910-940°C с последующим охлаждением в селитровой ванне до температуры 450...500°C, а также правлению, омеднению и другим вспомогательным операциям.



Химический состав стали

Таблица 1

Класс арматуры	Суммарное обжатие %	Содержание элементов, %							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
Вр-П	44	0,84	0,59	0,26	0,019	0,034	-	-	-
В-П	61	0,84	0,61	0,24	0,019	0,032	0,13	0,07	0,11

Волочение осуществлялось на высокоскоростных станах 4-7/550 и 2500/6. Величина частных обжатий колебалась в пределах 14...24%. Часть проволоки классов Вр-П и В-П была подвергнута после правки низкотемпературному отпуску на заводском агрегате в соответствии с ГОСТ 7348-81. Режим отпуска соответствовал технологической карте завода, совпадал с параметрами термической обработки проволоки на других заводах и разработан на основе специально проведенных исследований [9].

На основании всесторонних и тщательно проведенных исследований физико-механических свойств и релаксации напряжений у большого количества образцов [2, 8] институтом "Ростовский ПромстройНИИпроект" (Россия) был рекомендован оптимальный режим стабилизации высокопрочной проволоки классов Вр-П и В-П, а также канатов К-7:

- температура нагрева - 275...325°C
- длительность вытяжки и нагрева до заданной температуры - 5...15 с
- напряжение вытяжки - 55...65%
- момент охлаждения после нагрева до заданной температуры - через 2...10 с
- охлаждающая среда - вода или другой интенсивный охладитель

В соответствии с предлагаемым режимом и проводилась механо-термическая обработка опытной партии неотпущенной высокопрочной проволоки классов Вр-П и В-П диаметром 5мм.

Не отпущенная проволока, подвергнутая на заводе правке, стабилизировалась на специальной установке. Установка для механо-термической обработки высокопрочной проволоки (рис. 1) состоит из силовой рамы, натяжных и анкерных устройств, рычажного стабилизатора давления, понижающего трансформатора, жидкостного реостата, токоизмерительной аппаратуры, приборов для контроля температуры образца и усилия вытяжки, которое создавалось 30-ти тонным гидравлическим домкратом с помощью электрической насосной станции.

Концевые участки отрезков арматурной проволоки длиной 8,2м снабжались канговыми захватами. К проволоке приваривалась хромель-копелевая термопара 11 диаметром 0,5мм. Затем проволока устанавливалась в переходные рамки 14 и с помощью диэлектрических прокладок 3 изолировалась от них. Винтом 6 производилось натяжение проволоки усилием, равным 4...5% от разрывного. Далее включали в сеть потенциометр 13 и к рамам 4 присоединяли токопроводящие провода от трансформатора 7. После этого включали насосную станцию 15 и приводили в исходное состояние стабилизатор давления 17.

Далее в течение 2...3 с в рабочей камере гидродомкрата 15 создавали давление, обеспечивающее заданное усилие вытяжки, составляющее $0,65P_u$. С помощью насоса, домкрата и гравитационного стабилизатора давление, заданное усилие вытяжки поддерживалось постоянным в процессе стабилизации арматурной проволоки.

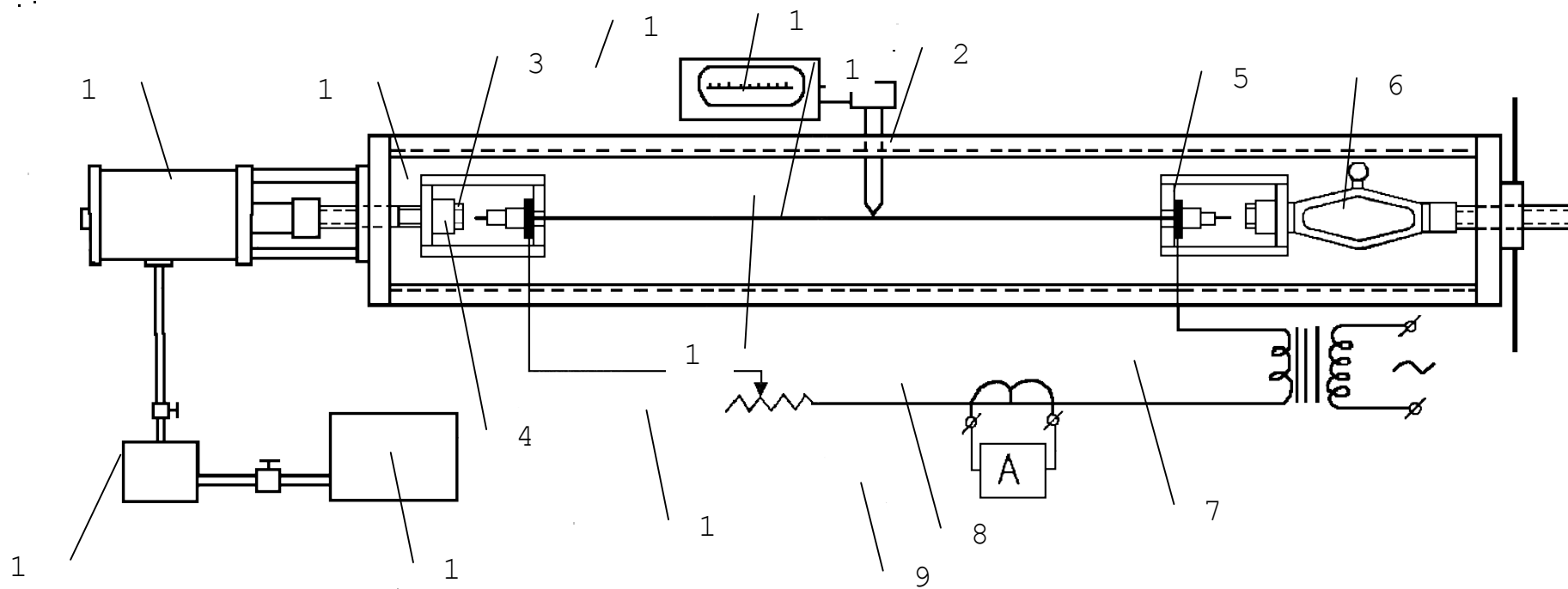


Рис. 1. Установка для стабилизации проволоки

1 – проволока; 2 - силовая рама; 3 - диэлектрическая прокладка; 4 - зажим; 5 - динамометр; 6 - натяжной болт;
7 - трансформатор понижающий; 8 – трансформатор шока; 9 – амперметр; 10 - реостат; 11 - электроды термопары;
12 – помехоподавляющее устройство; 13 - электронный автоматический потенциометр; 14 - рама переходная;
15 - домкрат гидравлический; 16 - насосная станция; 17 - стабилизатор давления.



После создания заданного усилия вытяжки включали понижающий трансформатор 7 и реостатом 10 устанавливали определенную силу тока и поддерживали ее постоянной при нагреве проволоки. Требуемая сила тока определялась опытным путем [7]. После того, как образец нагревался до требуемой температуры (300...310°C), нагрев его прекращали путем отключения трансформатора 7 и далее производилось охлаждение образца напряженной арматурной проволоки водой одновременно по всей длине в течение 6...8 с. Затем натяжение снималось.

Источником тока низкого напряжения служил трансформатор ТСД-2000. Напряжение первичной обмотки трансформатора 380В, вторичной – 70...80В (без нагрузки), допустимый ток во вторичной обмотке до 2000А. Последовательно с нагреваемым образцом арматурной проволоки был включен электролитический реостат, позволяющий регулировать силу тока от 0 до 1800 А. Сила тока контролировалась трансформатором типа ТНШЛ кл. 0,5 или УТТ-5 кл. 0,2 и прилагаемыми к ним амперметрами.

Датчиком температуры при нагреве образца служила хромелькопелевая термопара, привариваемая контактным способом к проволоке. Такой метод крепления термопары при быстром изменении температуры (до 60°C/с) является наиболее рациональным [7]. Перед началом экспериментов производилась проверка термопары. Термо-э.д.с. термопары измеряли компенсационным катодом с помощью образцового потенциометра ПмС-48 кл. 0,02. Отклонение показаний проверяемой термопары не превышали допустимых по ГОСТу 3044-77. Использовался метод приварки термопары к арматурной проволоке, приведенный в работе [7]. Поверхность контакта термопары с арматурной проволокой не превышала 1-2 мм².

Для уменьшения влияния электромагнитных полей электроды (проволоки) термопары были скручены и помещены в стальной гибкий чехол, который соединялся с корпусом потенциометра. Кроме этого, каждый электрод термопары соединялся через бумажный конденсатор с корпусом прибора с помощью специального помехозащитного устройства. Усилие вытяжки контролировалось образцовым динамометром 5. нестабилизированной) про Физико-механические свойства проволоки устанавливались по средним результатам испытания 5-6 одинаковых образцов каждого класса проволоки (табл. 2.2).

Физико-механические характеристики

Таблица 2

Класс арматуры	E_s , МПа	$\sigma_{0,01}$, МПа	$\sigma_{0,05}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_u , МПа	δ_{100} , %	δ_p , %
Не отпущенная Вр-П	187696	738	920	116,7	1562	3,95	1,86
		47	59	74			
Не отпущенная В-П	203297	817	1077	1404	1777	3,92	1,31
		46	61	79			
Отпущенная Вр-П	207875	1057	1340	1432	1625	5,4	2,24
		65	82	88			
Отпущенная В-П	211590	1083	1416	1563	1777	4,72	2,35
		61	80	88			
Стабилизированная Вр-П	208086	1231	1545	1600	1660	4,6	2,03
		74	93	96,4			
Стабилизированная В-П	213082	1358	1648	1736	1818	4,37	2,05
		75	91	96			



Примечание. Под чертой приведены значения напряжения в процентах от σ_u .

Из приведенных данных видно, что низкотемпературный отпуск и стабилизация арматуры повышают ее упруго-пластические характеристики. После отпуска условные пределы упругости ($\sigma_{0,01}$ и $\sigma_{0,05}$) и текучести ($\sigma_{0,2}$) и временное сопротивление (σ_u) повысились соответственно в среднем на 38, 39, 18 и 2%. Прочностные и упругопластические характеристики всей отпущенной проволоки отвечали требованиям ГОСТ 7348-81 и в большинстве случаев были выше своих нормативных значений.

Значительное увеличение $\sigma_{0,01}$, $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$, и σ_u получено после стабилизации - соответственно в среднем на 67, 60, 31 и 4%. В результате условный предел текучести, являющейся основной характеристикой напрягаемой арматуры, после стабилизации составлял 95...96,5% σ_u . Начальный модуль упругости E_s и временное сопротивление разрыву σ_u у отпущенных и стабилизированных образцов практически одинаковы. Удлинения стабилизированной проволоки δ_{100} после разрыва превышали 4% (см. табл. 2), что достаточно для арматурной стали.

Влияние стабилизации на свойства проволоки в основном объясняются релаксацией пиковых напряжений (остаточных или вблизи концентраторов) и эффектом торможения движения дислокаций путем их закрепления. Наличие в металле концентраций напряжений, неоднородности структуры, анизотропии свойств отдельных зерен, а также остаточных напряжений создает возможность микропластических деформаций в локальных участках металла при средних напряжениях, значительно меньших предела пропорциональности. Термомеханической обработкой стали обеспечивается более совершенное распределение напряжений по сечению проволоки в результате направленного перемещения дислокаций в сочетании с деформационным старением.

Напряжение вытяжки проволоки $0,65\sigma_u$ при температуре 300...310°C вызывает протекание процессов пластической деформации, перегруппировку и аннигиляцию дислокаций противоположных знаков, что характерно для отдыха наклепанного металла, а также перераспределение точечных дефектов и уменьшение их плотности. На стадии отдыха вакансии мигрируют к дислокациям и границам зерен, что повышает пластичность металла и частично снимает искажения кристаллической решетки.

Старение деформированного металла проволоки представляет собой процесс, при котором растворенные атомы, в основном азота и углерода мигрируют к дислокациям и удерживаются около них силами упругого взаимодействия, возникает установившееся распределение атомов вокруг дислокаций. При скольжении дислокации атмосфера, которая способна перемещаться только путем диффузии, отстает от ядра дислокаций и силы притяжения к атмосфере тормозят дислокацию. Как следствие, при этом повышается предел текучести стали [1].

Таким образом, одновременное воздействие силовой вытяжки и нагрева, способствующее релаксации пиковых напряжений по сечению проволоки и создающее за счет деформационного старения препятствие для движения дислокаций, повышает упругие свойства и релаксационную стойкость проволочной арматуры.

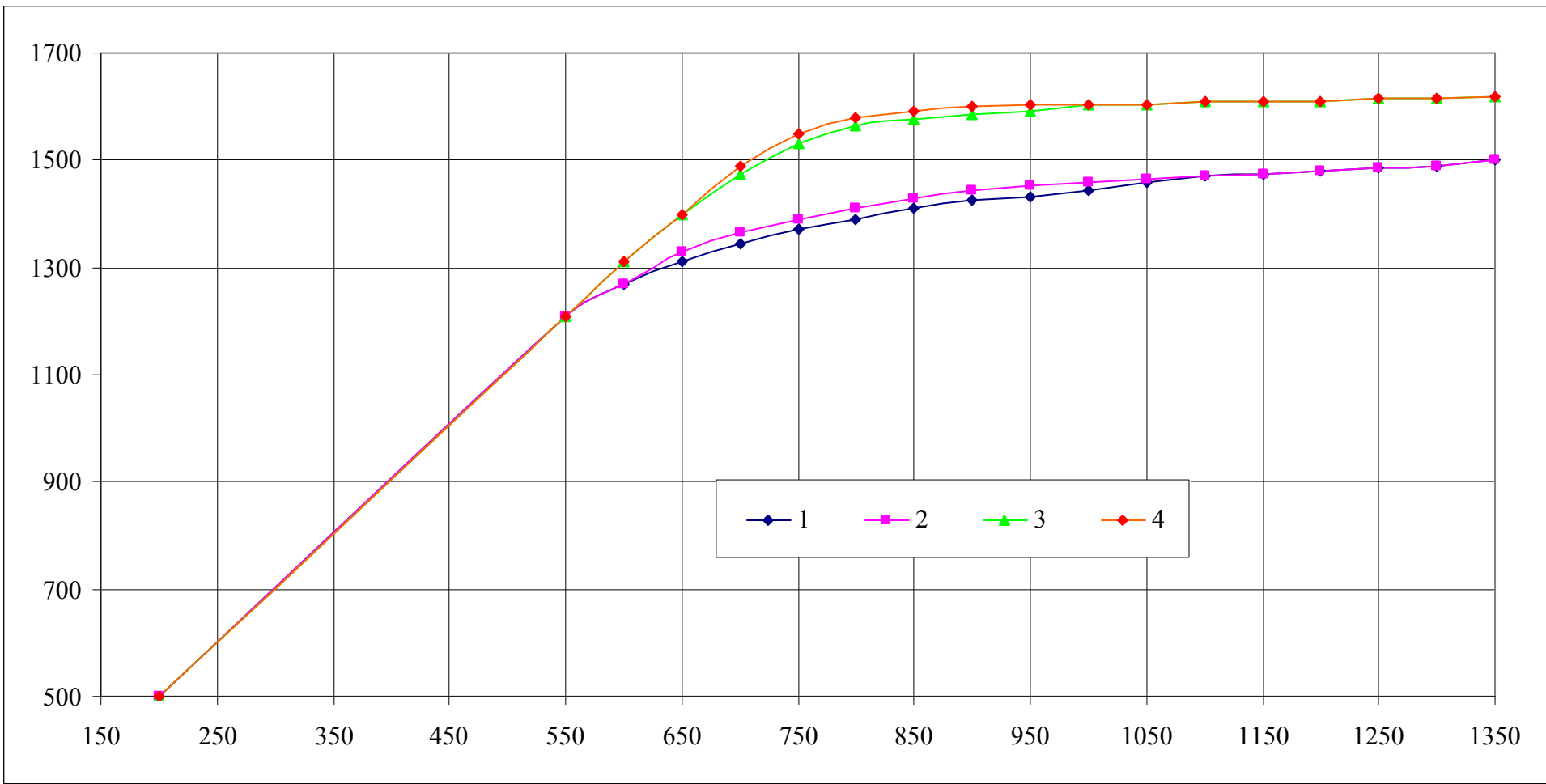
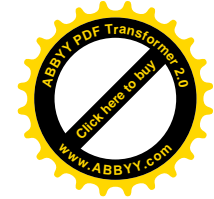
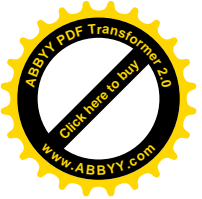


Рис. 2. Диаграммы деформирования высокопрочной проволоки класса Вр-II
1 – отпущенной (ГОСТ 7348-81) при кратковременном растяжении; 2 – то же для 15 циклов нагружения;
3 – стабилизированной при кратковременном растяжении; 4 – то же для 15 циклов нагружения;
- расчетные значения, определены с помощью сплайн – функции.

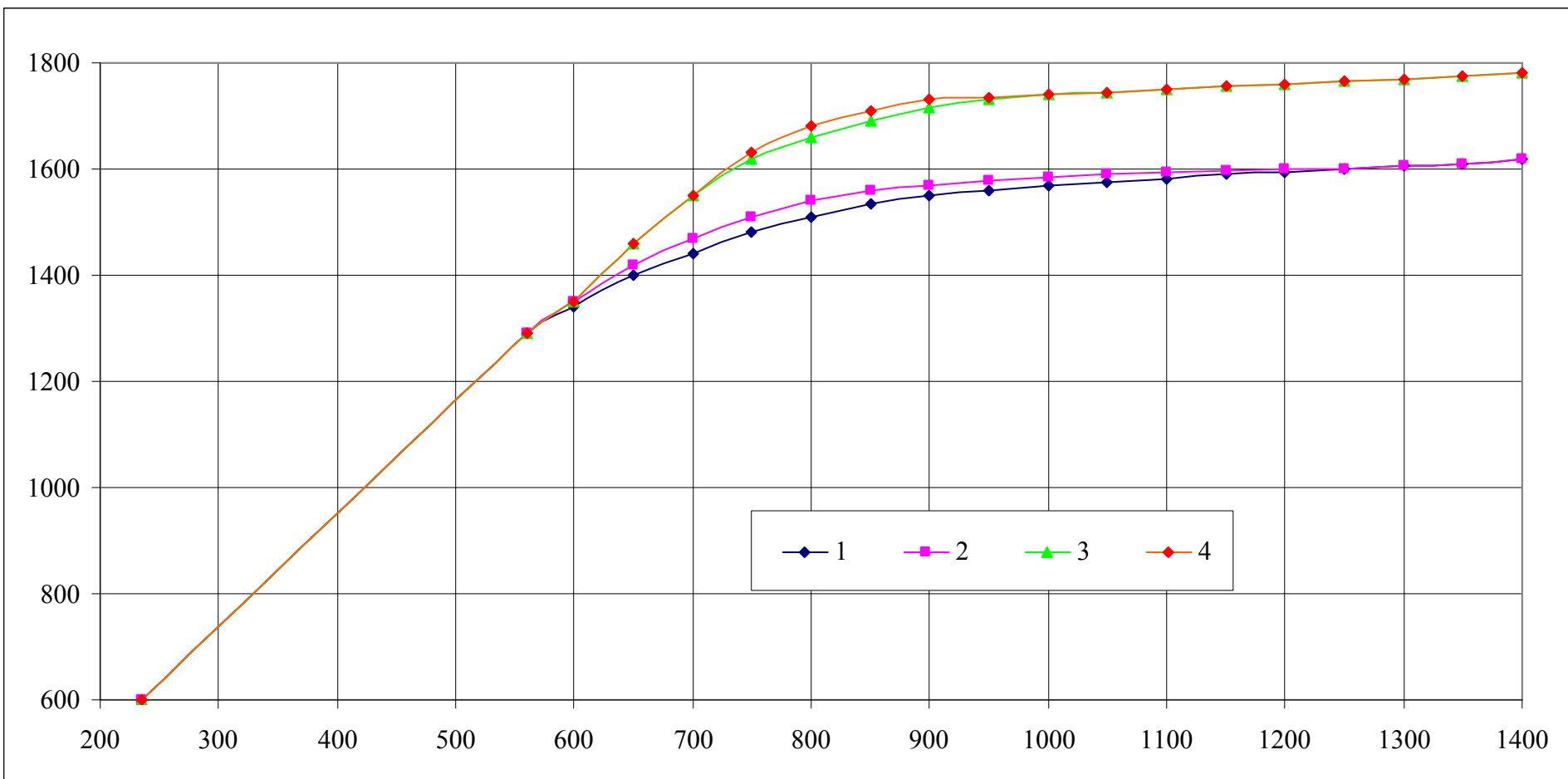
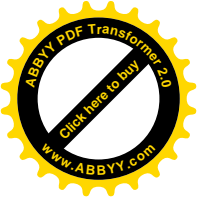


Рис. 3. Диаграммы деформирования высокопрочной проволоки класса В-II
1 – отпущенной (ГОСТ 7348-81) при кратковременном растяжении; 2 – то же для 15 циклов нагружения;
3 – стабилизированной при кратковременном растяжении; 4 – то же для 15 циклов нагружения;
- расчетные значения, определены с помощью сплайн – функции.



Литература

1. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия. – 1977.
2. Дуйшеналиев Т.Б. Прочность, трещиностойкость и деформативность железобетонных изгибаемых элементов, армированных высокопрочной стабилизированной проволокой, при статическом и многократно повторном нагружении. Дис. ... на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Ростов-наДону. – 1988.
3. Квицаридзе О.И. и др. Суперстабилизированная высокопрочная арматурная проволока и пряди для предварительно напряженного железобетона. Тбилиси: Менцниереба. – 1974.
4. Патенты Великобритании № 969191 и № 969192.
5. Патент Великобритании № 1012310
6. Патент Франции № 2030174.
7. Семенов А.И., Пиневиц С.С. Усталостная прочность стабилизированных арматурных канатов К-7 // Бетон и железобетон. – 1977. – № 9.
8. Семенов А.И., Максимовский В.А. Оптимальный режим стабилизации арматурных канатов К-7 и высокопрочной проволоки // Сталь. – 1982. – № 7.
9. Юхвец И.А. Производство проволочной арматуры. – М.: Металлургия. – 1973.