



УДК 621.771.252:621.778:669.1.017

Поступила 20.06.2016

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРЕДЕЛЬНОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ БУНТОВОГО ПРОКАТА ПРИ ВОЛОЧЕНИИ С ПАРАМЕТРАМИ ЕГО МИКРОСТРУКТУРЫ

THE CORRELATION BETWEEN ULTIMATE STRAIN ROLLED STEEL IN DRAWING WITH THE PARAMETERS OF MICROSTRUCTURE

Э. В. ПАРУСОВ, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины,
г. Днепропетровск, Украина, пл. Ак. Стародубова, 1. E-mail: tometal@ukr.net

С. И. ГУБЕНКО, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина,
пр. Гагарина, 4.

В. А. ЛУЦЕНКО, Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, Украина,
г. Днепропетровск, Украина, пл. Ак. Стародубова, 1. E-mail: lutsenko@optima.com.ua

А. Б. СЫЧКОВ, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия, пр. Ленина, 38

А. В. ВЕДЕНЕЕВ, ОАО «Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга
«БМК», г. Жлобин, Беларусь, ул. Промышленная, 37

E. V. PARUSOV, Ferrous Metal Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences
of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, 1, Starodubov ave. E-mail: tometal@ukr.net

S. I. GUBENKO, The National Metallurgical Academy Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

V. A. LUTSENKO, Ferrous Metal Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences
of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, 1, Starodubov ave. E-mail: lutsenko@optima.com.ua

A. B. SYCHKOV, Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk, Russia

A. V. VEDENEV, JSC «BSW – Management Company of Holding «BMC», Zhlobin city, Belarus, 37,
Promyshlennaya str.

Показана взаимосвязь деформационного упрочнения со степенью дисперсности перлита (межпластиночным расстоянием) и прочностными показателями бунтового проката диаметром 6,5 мм из стали марки С72D.

С использованием метода гидростатического взвешивания и рентгеноструктурного анализа установлено, что для повышения степени предельной деформируемости высокоуглеродистого бунтового проката на метизном переделе наиболее предпочтительным является высокотемпературная раскладка проката на витки с последующим контролируемым ускоренным воздушным охлаждением.

Результаты работы могут послужить основой для создания дополнительного способа неразрушающего контроля оценки качества холоднодеформированной проволоки.

The correlation of mechanical hardening to the degree of dispersion of the perlite (interlamellar spacings) and strength indices of rolled steel diameter of 6.5 mm made of steel grade C72D is showed.

Using the method of hydrostatic weighing and X-ray analysis it was established that to increase the degree of the deformability of high-carbon rolled during hardware production is the most preferred way is high-temperature unscramble of rolled coils with following process of controlled accelerated air cooling.

The results of the research could serve as a basis for the creation of an additional process of assessing the quality of cold wire by non-destructive testing.

Ключевые слова. Высокоуглеродистая сталь, деформационное упрочнение, дисперсность перлита, механические свойства, бунтовой прокат.

Keywords. High-carbon steel, mechanical hardening, dispersion of the perlite, mechanical properties, coil rolled steel.

Высокопрочная холоднодеформированная проволока из углеродистых марок стали находит достаточно широкое применение, в том числе она может использоваться как в качестве армирующего матери-

ала при производстве различных изделий (конвейерные ленты, клиновидные ремни, шланги высокого давления, металлокорд), так и в строительных предварительно напряженных конструкциях (арматурные канаты, проволочная арматура гладкого и периодического профилей).

Для разработки энерго- и ресурсосберегающих технологических схем изготовления вышеперечисленной металлопродукции постоянно осваиваются новые и совершенствуются существующие технологические режимы производства высокоуглеродистого бунтового проката (катанки).

Одним из главных критериев получения требуемого класса прочности и комплекса механических свойств готовой продукции является деформационное упрочнение, возникающее в процессе волочения бунтового проката на метизном переделе.

На показатель деформационного упрочнения значительное влияние оказывает морфология цементита (пластинчатый или глобулярный), входящего в состав перлитных колоний, а влияние межпластиночного расстояния (S_0) аналогично влиянию размера зерна феррита в низкоуглеродистых сталях: с уменьшением S_0 показатель деформационного упрочнения снижается [1, 2].

Согласно [1], показатель деформационного упрочнения (n_p) при одноосном растяжении для стали с перлитной структурой, близкой к эвтектоидному составу, описывается следующим эмпирическим выражением:

$$n_p = \frac{25}{(10 + S_0)}. \quad (1)$$

Прирост прочностных свойств, возникающий при волочении бунтового проката в проволоку на метизном переделе, является одним из факторов (механизмов) упрочнения углеродистых сталей вследствие накопления определенной плотности дислокаций в процессе холодной пластической деформации.

Увеличение объемной доли цементита независимо от его морфологии приводит к увеличению показателя деформационного упрочнения при растяжении (n_p) [2, 3]. Способность сталей к холодному пластическому формоизменению довольно часто оценивают по показателю деформационного упрочнения, который определяется при испытании на одноосное растяжение [2].

Известно, что пластины цементита в процессе деформации способны не только хрупко разрушаться, но и пластически деформироваться [2, 3]. Накопление дефектов кристаллического строения в процессе деформации может приводить к изменению формы пластин цементита и их размера, а также ориентации относительно направления оси волочения. При неоптимальном структурном состоянии (межпластиночное расстояние в перлите более 0,20 мкм) и значительных степенях деформации могут зарождаться скрытые необратимые дефекты (микротрещины), которые впоследствии приводят к существенному снижению как механических, так и эксплуатационных свойств готовой металлопродукции.

Следовательно, можно сделать вывод, что предельная степень деформируемости углеродистого бунтового проката, подвергаемого глубокой вытяжке на метизном переделе, определяется, прежде всего, максимально допустимой степенью деформации, при которой не наблюдается необратимое повреждение структуры металла.

Цель настоящей работы заключалась в установлении влияния режимов деформационно-термической обработки высокоуглеродистого бунтового проката на особенности формирования микроструктуры (степень дисперсности перлита) и предельную его деформируемость при волочении на метизном переделе.

В качестве материала для проведения исследований использовали промышленные партии бунтового проката диаметром 6,5 мм из стали марки С72D, химический состав которой соответствовал требованиям стандарта EN ISO 16120-2:2011 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Химический состав исследуемого бунтового проката

Марка стали	Химический состав стали, мас. %								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	N
С72D	0,73	0,54	0,19	0,009	0,001	0,04	0,03	0,11	0,004

Для оценки деформируемости бунтового проката в процессе волочения использовали взаимосвязь с показателем деформационного упрочнения при растяжении. В работах [3, 4] показано, что предельная

деформируемость углеродистых сталей при холодном волочении обратно пропорциональна показателю деформационного упрочнения при растяжении или значению n_B , рассчитанному по соотношению:

$$n_B = \frac{(\sigma_B - \sigma_{0,2})}{\sigma_B}, \quad (2)$$

где n_B – показатель деформационного упрочнения при волочении; σ_B – временное сопротивление разрыву, МПа; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа.

В качестве параметра микроструктуры для таких сталей используется среднее межпластиночное расстояние в перлите (S_0). В табл. 2 приведены результаты расчета показателей n_B по соотношению (2) и проведен сопоставительный анализ со значениями среднего межпластиночного расстояния в перлите исследуемого бунтового проката, который был подвергнут охлаждению на линии Стелмор с различными скоростями. Режимы деформационно-термической обработки охватывали диапазон температур виткообразования $T_{во} = 850\text{--}990$ °С, а изменение скорости воздушного охлаждения ($V_{охл}$) на роликовом транспортере осуществлялось в интервале скоростей 7–18 °С/с.

Т а б л и ц а 2. Зависимость среднего межпластиночного расстояния в перлите и деформационного упрочнения бунтового проката от температурно-скоростных параметров охлаждения

Номер режима	$T_{во}$, °С	$V_{охл}$, °С/с	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	n_B	S_0 , мкм
1	990±10	18	1180	760	0,356	0,116
2	950±10	15	1160	738	0,363	0,127
3	950±10	12	1130	701	0,380	0,141
4	900±10	10	1070	638	0,404	0,174
5	900±10	8	1062	627	0,410	0,183
6	850±10	7	1040	594	0,429	0,238

Из таблицы видно, что между показателями n_B и S_0 существует значимая статистическая связь. Значения n_B снижаются при уменьшении межпластиночного расстояния в перлите. Учитывая обратную зависимость деформируемости от величины n_B , можно сделать вывод о том, что повышенной степенью предельной деформируемости будет обладать бунтовой прокат с более низкими значениями n_B . У проката, охлажденного по режиму № 1, значение n_B составляет 0,356. Близкие значения механических свойств и показатель деформационного упрочнения наблюдаются и для проката, охлажденного со скоростями 15 и 12 °С/с (режимы № 2, 3). При этом величина среднего межпластиночного расстояния в перлите меняется незначительно и находится в интервале 0,127–0,141 мкм. В прокате, охлажденном на линии Стелмор по режимам № 4–6, механические свойства и показатель деформационного упрочнения значительно отличаются от режимов № 1–3. Средние значения межпластиночного расстояния в перлите составляют 0,174; 0,183 и 0,238 мкм, а показатель n_B повышается до 0,404; 0,410 и 0,429 соответственно.

Такое изменение характера n_B позволяет сделать вывод о возможном уменьшении предельной деформируемости бунтового проката, изготовленного по режимам № 4–6 в сравнении с режимами № 1–3. На основании изложенного для проведения исследований выбран бунтовой прокат, изготовленный по технологическим режимам № 1, 3 и 6.

Предельную деформируемость при волочении бунтового проката в проволоку исследовали по влиянию суммарного относительного обжатия на плотность металла и интегральную плотность дефектов кристаллического строения. В процессе проведения исследований применяли методы гидростатического взвешивания и рентгеноструктурного анализа.

Интегральную плотность дефектов кристаллического строения феррита в холоднотемпературной проволоке оценивали по уширению интерференций β_{220} феррита. Съёмку рентгеновских линий осуществляли в характеристическом излучении карбонильного железа на дифрактометре ДРОН-УМ2. Оценку уровня микродеформации решетки феррита (напряжения II рода) $\Delta a/a$ в бунтовом прокате выполняли методом аппроксимации [5].

Волочение бунтового проката осуществляли на 13-кратном прямоточном волочильном стане марки «Koch» по следующим технологическим маршрутам:

6,5→5,75→5,10→4,53→4,02→3,57→3,17→2,81→2,49→2,20, мм;

6,5→5,75→5,10→4,53→4,02→3,57→3,17→2,81→2,49→2,20→1,96→1,76→1,60, мм.

Суммарное относительное обжатие при производстве проволоки диаметрами 2,20 и 1,60 мм составило 88,5 и 93,2% соответственно.

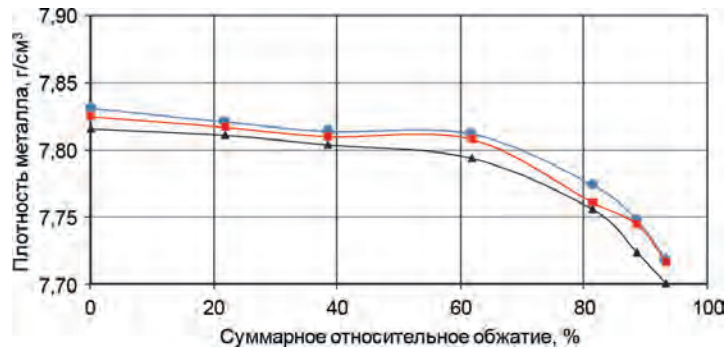


Рис. 1. Влияние суммарного относительного обжатия на плотность металла: ● – режим № 1; ■ – режим № 3; ▲ – режим № 6

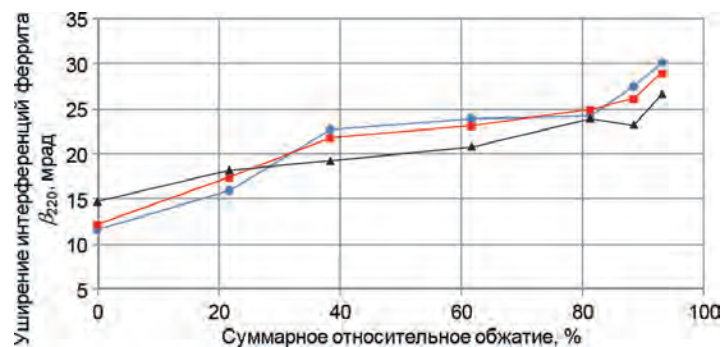


Рис. 2. Изменение уширения рентгеновской интерференции феррита β_{220} в зависимости от суммарного относительного обжатия: ● – режим № 1; ■ – режим № 3; ▲ – режим № 6

Характер накопления дефектов и возможность холодного волочения проката со значительными степенями деформации без развития необратимых дефектов выявляли изменением плотности исходного бунтового проката и холоднодеформированной проволоки методом гидростатического взвешивания [6, 7]. Для определения среднего значения плотности проката и деформированной проволоки для каждой из степеней деформации проводили взвешивание шести образцов.

Расчет плотности бунтового проката и холоднодеформированной проволоки, подвергнутой различным степеням деформации, проводили по выражению [6, 7]:

$$\rho_M = \frac{m}{m_1 - m_2} \rho_{ж}, \quad (3)$$

где ρ_M – рассчитываемая плотность металла, г/см³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, определенная погружным электронным плотномером при заданной температуре, г/см³; m , m_1 , m_2 – соответственно масса образца на воздухе, подвесе, с подвесом в жидкости, г.

В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду, температура которой поддерживалась в диапазоне $21 \pm 0,3$ °С.

На рис. 1 показано изменение плотности металла в зависимости от степени деформации. Общий вид полученных кривых (режимы № 1, 3 и 6) свидетельствует о снижении плотности металла при увеличении степени деформации.

Полученные результаты не противоречат известным данным о снижении плотности металла с увеличением плотности дислокаций, в частности параболической кривой Геренса, которая описывает уменьшение плотности чистого железа при увеличении степени деформации [8]. По изменению хода кривых плотности металла можно судить о накоплении дефектов в процессе холодной пластической деформации.

Для проката, охлажденного по режиму № 6, снижение плотности при высоких степенях деформации происходит наиболее интенсивно, что свидетельствует о накоплении большего числа дефектов. Такое поведение хорошо согласуется с данными рентгеноструктурного анализа (рис. 2).

В число дефектов, снижающих плотность материала, входят не только дислокации и вакансии, но и микротрещины. Если снижение плотности с ростом степени деформации произошло за счет увеличения плотности дефектов кристаллической решетки, то после фазовой перекристаллизации плотность металла должна восстанавливаться или иметь близкие значения с плотностью исходного металла. Если

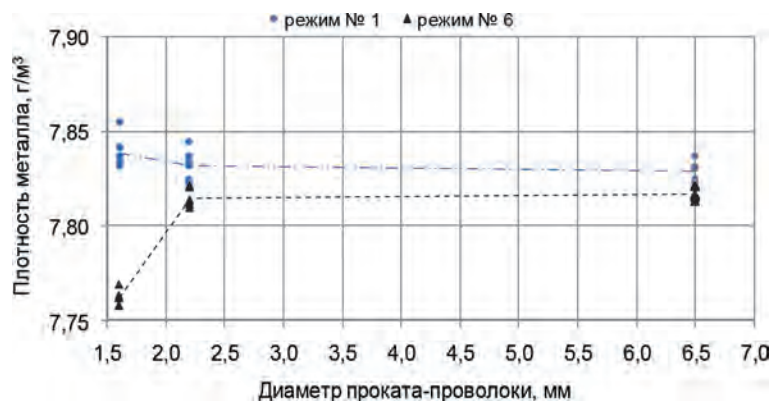


Рис. 3. Сравнительный анализ плотности бунтового проката и патентированной проволоки

после патентирования холоднодеформированной проволоки в структуре металла имеются значительные дефекты (микротрещины), то плотность не возвратится к исходным значениям, и будет меньше, чем у исходного металла.

Для проверки необратимого повреждения металла холоднодеформированную проволоку диаметрами 2,20 и 1,60 мм (изготовленную из проката, охлажденного по режимам № 1 и 6) подвергали патентированию по следующему режиму: температура аустенитизации – 950 °С, время выдержки – 30 с, последующее охлаждение в расплаве свинцовой ванны – при температуре 550 °С в течение 28–37 с, далее – на воздухе.

Расчет плотности патентированной проволоки выполняли аналогичным методом согласно выражению (3).

Анализ полученных данных (рис. 3) свидетельствует о том, что плотность образцов диаметром 2,20 мм после проведения патентирования восстановилась и возвратилась почти к исходным значениям, наблюдаемым в горячекатаном металле. Незначительная разница значений плотности для проволоки и исходного проката объясняется различиями структурного состояния (степенью дисперсности перлита), а также разбросом значений условий эксперимента. В проволоке диаметром 1,60 мм, изготовленной из проката, охлажденного по режиму № 6, зафиксировано снижение плотности, что свидетельствует о наличии в ее структуре необратимых дефектов (микротрещин).

Анализ изменения плотности металла при волочении бунтового проката диаметром 6,5 мм (режим № 1) в проволоку диаметрами 2,20 и 1,60 мм свидетельствует о том, что после суммарного относительного обжатия 93,2% необратимое повреждение металла не наблюдается. Это дополнительно подтверждается и данными о характере изменения уширения интерференций β_{220} феррита в зависимости от степени деформации (см. рис. 2).

Охлаждение бунтового проката по режимам № 1, 3 (см. рис. 2) обеспечивает в металле наиболее низкие значения уширения интерференций β_{220} феррита 11,61 и 12,25 мрад соответственно против 14,83 мрад (режим № 6), что свидетельствует о более низкой плотности дефектов кристаллического строения в горячекатаном бунтовом прокате. Несколько ниже и напряжения II рода: $\Delta a/a = 0,97 \cdot 10^{-3}$; $0,99 \cdot 10^{-3}$ (режимы № 1, 3) против $\Delta a/a = 1,08 \cdot 10^{-3}$ (режим № 6). Принимая во внимание значения среднего межпластиночного расстояния в перлите 0,116; 0,141 и 0,238 мкм проката, изготовленного по режимам № 1, 3 и 6 соответственно, можно предположить, что различия в исходной плотности дефектов определяются неодинаковым состоянием твердого раствора. Это обусловлено режимами деформационно-термической обработки и влиянием структурного фактора (степени дисперсности перлита).

В процессе холодной пластической деформации (см. рис. 2) плотность дефектов кристаллического строения увеличивается, уширение интерференций β_{220} феррита возрастает с близкой для всех исследуемых режимов интенсивностью до обжатия ~22%, при более высоких степенях деформации в ходе кривых появляются некоторые различия. Перегибы на кривых (режим № 1, 3) в интервале степеней деформации 40–70%, очевидно, связаны с преобразованием ячеистой структуры в фрагментированную [9], которое происходит при более высоких степенях деформации, чем по режиму № 6.

При деформации вблизи значения 80% на кривой (режим № 6) наблюдаются некоторое уменьшение уширения интерференций β_{220} феррита и дальнейший рост при увеличении деформации до 93,2%. Уширение интерференций β_{220} феррита для проката, охлажденного по режимам № 1 и 3 при аналогичных степенях деформации, монотонно растет и превышает значения для режима № 6.

Одной из возможных причин нарушения монотонности изменения уширения интерференций β_{220} феррита для проката, охлажденного по режиму № 6, при деформации свыше 80% является образование необратимых дефектов и связанное с этим уменьшение интегральной плотности дефектов кристаллического строения.

Отсутствие существенных перегибов в области деформаций 80–93,2% на кривых (режимы № 1 и 3) свидетельствует о повышенной устойчивости такого металлопроката к образованию микротрещин.

В результате проведенных исследований можно утверждать, что деформируемость бунтового проката, изготовленного по режимам № 1–3, является достаточной для волочения с суммарным относительным обжатием до 93,2% без развития необратимых дефектов в структуре холоднодеформированной проволоки.

Полученные в настоящей работе результаты могут послужить основой для создания дополнительного способа неразрушающего контроля оценки качества холоднодеформированной проволоки в отличие от стандартно применяемых на практике (разрывное усилие, число скручиваний и перегибов).

Выводы

1. Взаимосвязь показателя деформационного упрочнения со степенью дисперсности перлита (межпластиночным расстоянием) и прочностными показателями свидетельствует о том, что для повышения деформируемости высокоуглеродистого бунтового проката на метизном переделе наиболее предпочтительным является повышение температуры виткообразования до ~ 1000 °С с последующим ускоренным воздушным охлаждением со скоростью ~ 18 °С/с.

2. Установлено, что образующиеся микротрещины в процессе холодной деформации металла при суммарном относительном обжатии 88,5 и 93,2% залечивались, а необратимое повреждение металла характерно для проволоки диаметром 1,60 мм, изготовленной из бунтового проката, охлажденного от температуры виткообразования 850 °С со скоростью 7 °С/с и характеризующегося повышенным средним межпластиночным расстоянием в перлите (0,238 мкм).

3. Выполненные исследования могут послужить основой для создания дополнительного способа неразрушающего контроля с целью дополнительной оценки качественных показателей холоднодеформированной проволоки на метизных предприятиях.

Литература

1. Вакуленко И. А. Структура и свойства углеродистой стали при знакопеременном деформировании / И. А. Вакуленко. Днепропетровск, 2003. 94 с.
2. Вакуленко И. А. Морфология структуры и деформационное упрочнение стали / И. А. Вакуленко, В. И. Большаков. Днепропетровск: Изд-во ДНУЖТ акад. В. Лазаряна, 2007. 191 с.
3. Влияние химического состава высокоуглеродистой катанки на деформационное упрочнение при волочении / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко [и др.] // Сб. науч. тр. «Строительство, материаловедение, машиностроение». 2006. Вып. 36. Ч. 1. С. 114–119.
4. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки / В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов. Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.
5. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. М.: Металлургия, 1970. 366 с.
6. Москвоская Т. Э. Определение плотности тел гидростатическим взвешиванием. Иркутск: ИГУ, 2003. 16 с.
7. Матренин С. В. Определение плотности материалов: метод. указание по курсу «Механические и физические свойства материалов», Томск: Изд-во. ТПУ, 2006. 8 с.
8. Глинка Н. Л. Общая химия: учеб. пособ. 22-е изд. исправ. Л.: Химия, 1982. 720 с.
9. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.

References

1. Vakulenko I. A. *Struktura i svoystva uglerodistoy stali pri znakoperemennom deformirovanii* [The structure and properties of carbon steel at alternating deformation]. Dnepropetrovsk, 2003. 94 p.
2. Vakulenko I. A. *Morfologiya struktury i deformatsyonnoe uprochnenie stali* [The morphology of the structure and strain hardening steel]. Dnepropetrovsk, DNURT acad. V. Lazaryana Publ., 2007. 191 p.
3. Parusov E. V., Parusov V. V., Lutsenko V. A. [and other]. *Vliyanie khimicheskogo sostava vysokouglerodistoy kataniki na deformatsyonnoe uprochnenie pri volochanii* [Influence of the chemical composition of high-carbon wire rod in the hardening during drawing]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie» = Collection of scientific works «Construction, materials science, mechanical engineering»*, 2006, no. 36, pp. 114–119.
4. Parusov V. V., Sychkov A. B., Parusov E. V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoeffektivnykh vidov kataniki* [Theoretical and technological bases of the production of highly effective types of wire rod]. Dnepropetrovsk, Art-press Publ., 2012. 376 p.

5. **Gorelik S. S.** *Rentgenograficheskiy i elektronno-opticheskiy analiz* [X-ray and electron-optical analysis]. Moscow, Metallurgy Publ., 1970. 366 p.
6. **Moskovskaya T. E.** *Opreделение плотности тел гидростатическим взвешиванием* [Determination of density bodies of hydrostatic weighing]. Irkutsk, IGU Publ., TPU, 2003. 16 p.
7. **Matrenin S. V.** *Opreделение плотности материалов* [Determination of the density of materials]. Tomsk, TPU Publ., 2006. 8 p.
8. **Glinka N. L.** *Obshchaya khimiya* [General chemistry]. Leningrad, Chemistry Publ., 1982. 720 p.
9. **Rybin V. V.** *Bolshye plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [Large plastic deformation and fracture of metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1986. 224 p.