КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.771.252:620.22 На правах рукописи

**КУЗЬМИНОВА НАДЕЖДА ЮРЬЕВНА**

**Исследование свойств и структуры непрерывнолитого металла  
с целью разработки рекомендаций по повышению его качества**

6М071000 – Материаловедение и технология новых материалов

Диссертация на соискание академической степени  
магистра техники и технологии

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент **Кривцова О.Н.**

Научный консультант:  
кандидат технических наук,  
доцент **Талмазан В.А.**

Научный консультант:  
кандидат технических наук,  
доцент **Лехтмец В.Л.**

Республика Казахстан  
Темиртау, 2015

АҢДАТПА

ӘОК 621.771.252:620.22

Үздіксіз құйылған металдардың сапасын жоғарылатуы бойымен ұсыныстарды жасау мақсатымен құрылым мен қасиеттердi зерттеу. Техника және технология магистрiнiң академиялық дәрежесiн талап етуге дис­сер­та­ция. – Теміртау: «ҚМИУ» РМК ШЕҚте, 2015. – 189 б.

Ғылыми жетекшiсі: Кривцова О.Н. ғылыми техникалық кандидаты.

Зерттеушi тәжiрибе: «ҚМИУ» РМК «ЭМжН» ИПЗ.

Диссертация графикалық бөлімі 65 слайдта және түсіндірме жазба А4 форматта 189 бетте 8 бөлімі, қорытынды және қолданылған әдебиеттер тiзiмінен тұрады. Түсіндірме жазба 62 кесте, 121 суреттер және 21 парақта 6 қосымша 116 библиографиялық көздерден тұрады.

Бiрiншi бөлiмiнде сортты таптау өндiрiстiң қазiргi күйдiң әдеби патент­тік шолуы орындалған. Темiр-бетонды құрылымдар үшiн арматуралық тап­тау сапаға қойылатын жалпы талаптары арастырылған. Арматуралық таптау жіктемесі ұсынылды. Арматуралық таптауды өндіруге арналған ұсақ сорты стандарының жабдықтары сипатталды. Арматуралық болаттың қасиеттерi және құрылымның жетiлдiруiнiң қазiргi тәсiлдерiнің шолуы орындалған.

Екiншi бөлiмде диссертациялық зерттеу объектiнiң сипаттамасы ұсы­ныл­ды. «АрселорМиттал Теміртау» АҚ сортты илектеу цехінің қысқаша сипаттамасы берілді, қондырғының жабдығы атап өтiлген және 320 ұсақ сорт­ты үздіксіз станда периодты кескiнің арматуралық таптау өндiрiсінің технологиясы сипатталған. Арматуралық таптау сипаттамасы ұсынылды.

Үшiншi бөлiмiнде және тәжiрибелi деректердi талдаудың әдiстемесi атап өтiлді және сипатталған: статистикалық, квалиметрикалық және метал­ло­гра­фиялық талдау, технологиялық процестiң компьютер модельдеуi үшiн бағдарламалық кешендi таңдау iске асырылған.

Төртiншi бөлiмде әр түрлi кескiндердiң арматуралық болаттың метал­ло­графиялық зерттеулер нәтижесі ұсынылды. Зерттелетiн материал және пай­даланылған металлографиялық жабдығы суреттелді. Арматуралық ме­тал­дың микроқұрылымның фотосуреттер ұсынылды.

Бесінші бөлiмiнде тәжiрибелi деректердi алдын-ала өңдеуі келтірілген, металдың химиялық құрамынан және технологиялық факторлардан таптау­дың механикалық қасиеттердiң көп факторлы регрессиялық тәуелдiлiктер алы­нып және талданған.

Алтыншы бөлiмiнде арматуралық таптаудың әр түрлi кескiндердің са­па­ның кешендi квалиметриялық бағалауы орындалды. Болат маркасының хи­мия­лық құрамы сапаның әсерi таптаудың механикалық қасиеттердiң са­па­сы­на бағаланған.

Жетiншi бөлiмде үш әр түрлi калибрлерде №20 арматуралық кескiндi таптауын модельдеу орындалған. Кернеулік-деформациялық күйдің бiр­кел­кi­лiк көзқарасымен оңтайлы калибрді таңдауы жасалды.

Сегiзiншi бөлiмде аз көмiртектi болат маркасын микролегірлеу және тө­мен легірленген арматуралық болатты қыздыру нығайтуды сыннан өткізу нәтижелерi сипатталған.

ABSTRACT

UDC 621.771.252:620.22

Kuz’minova N.Yu. Research of properties and structure of continuously cast metal with the aim of developing recommendations to improve its quality. The dissertation for the academic degree of master of engineering and technology. – Temirtau: RSE «KSIU», 2015. – 189 p.

Scientific supervisor: candidate of technical sciences Krivtsova O.N.

Research practice: LIP "EM&N" RSE "KSIU".

The thesis contains the graphical part of 65 slides and explanatory note of 8 chapters, conclusion and list of references on 189 sheets of A4 format. Explanatory note contains 62 tables, 121 figures and 6 apps on 21 sheets of A4 format, 116 bibliography sources.

The first section is made patent-literature review of current status of rolling production. Discusses the common requirements for quality reinforcing bars for concrete structures. The classification of rebar is written. The equipment described light mills for the production of rebar. There is a review of modern methods of improvement of structure and properties of reinforcing steel.

The second section presents a description of the object of the dissertation research. Gives a brief description of shape rolling shop of JSC "ArcelorMittal Temirtau", lists the mill equipment and describes the technology of production of rebar periodic profile on a continuous light-section mill 320. The characteristic of rebar is described.

The third section lists and describes the methods of analysis of experimental data: statistical, qualitative and metallographic analysis, the choice of software for computer simulation of technological process.

The fourth section presents the results of metallographic studies of rebar of different profiles. Described the material and metallographic equipment used. Presents photographs of the microstructures of the reinforcing metal.

In the fifth section, pre-processing of experimental data obtained and analyzed by multivariate regression dependence of the mechanical properties of the rolled chemical composition of metal and technological factors.

The sixth section has performed a comprehensive qualitative assessment of the quality of rebar of different profiles. The effect of the quality of the chemical composition of steel on the mechanical properties of rolled products.

The seventh section is the simulation of the rolling of rebar № 20 in three different calibers. Made the optimal choice of caliber from the viewpoint of the uniformity of stress-strain state.

In the eighth section describes the results of testing a low carbon microalloying steels and hardening of low-alloyed reinforcing steel.

Аннотация

УДК 621.771.252:620.22

Кузьминова Н.Ю. Исследование свойств и структуры непрерывнолитого металла с целью разработки рекомендаций по повышению его качества. Диссертация на соискание академической степени магистра техники и технологии. – Темиртау: РГП на ПХВ «КГИУ», 2015. – 189 с.

Научный руководитель: кандидат технических наук Кривцова О.Н.

Исследовательская практика: ЛИП «ЭМиН» РГП «КГИУ».

Диссертация содержит графическую часть на 65 слайдах и пояснительную записку из 8 глав, заключения и списка использованных источников на 189 листах формата А4. Пояснительная записка содержит 62 таблицы, 121 рисунок и 6 приложений на 21 листе формата А4, библиография 116 источников.

В первом разделе выполнен литературно патентный обзор современного состояния сортопрокатного производства. Рассмотрены общие требования к качеству арматурного проката для железобетонных конструкций. Представлена классификация арматурного проката. Описано оборудование мелкосортных станов для производства арматурного проката. Выполнен обзор современных способов улучшения структуры и свойств арматурной стали.

Во втором разделе представлено описание объекта диссертационного исследования. Дана краткая характеристика Сортопрокатного цеха АО «Арселор­Миттал Темиртау», перечислено оборудование стана и описана технология производства арматурного проката периодического профиля на мелкосортном непрерывном стане 320. Представлена характеристика арматурного проката.

В третьем разделе перечислены и описаны методики анализа опытных данных: статистический, квалиметрический и металлографический анализ, осуществлен выбор программного комплекса для компьютерного моделирования технологического процесса.

В четвертом разделе представлены результаты металлографических исследований арматурной стали различных профилей. Описаны исследуемый материал и использованное металлографическое оборудование. Представлены фотографии микроструктур арматурного металла.

В пятом разделе проведена предварительная обработка опытных данных, получены и проанализированы многофакторные регрессионные зависимости механических свойств проката от химического состава металла и технологических факторов.

В шестом разделе выполнена комплексная квалиметрическая оценка качества арматурного проката различных профилей. Оценено влияние качества химического состава стали на качество механических свойств проката.

В седьмом разделе выполнено моделирование прокатки арматурного профиля №20 в трех различных калибрах. Сделан выбор оптимального калибра с точки зрения равномерности напряженно-деформированного состояния.

В восьмом разделе описаны результаты опробования микролегирования малоуглеродистой марки стали и термического упрочнения низколегированной арматурной стали.

СОДЕРЖАНИЕ

**Нормативные ссылки** 6

**Определения** 9

**Обозначения и сокращения** 11

**Введение** 12

**1 Литературно-патентный обзор** 15

**1.1 Строительная арматура: применение и тенденции развития** 15

**1.2 Общие требования к качеству арматурного проката для железобетонных конструкций** 18

1.2.1 Общие требования к арматуре 18

1.2.2 Преимущества термомеханически упрочненного проката 21

**1.3 Классификация арматурного проката и терминология** 24

**1.4 Оборудование мелкосортных станов для производства арматурного  
проката** 25

1.4.1 Назначение различного оборудования мелкосортных станов 25

1.4.2 Перспективы развития мелкосортных станов 27

**1.5 Способы улучшения структуры и свойств арматурной стали** 30

1.5.1 Влияние химических элементов 30

1.5.2 Влияние режимов прокатки на структуру и механические свойства арматурного проката 41

1.5.3 Влияние газонасыщенности на структуру и свойства арматурного проката 42

1.5.4 Математическое моделирование для прогнозирования механических свойств при деформационно-термическом упрочнении сортового проката 46

1.5.5 Оценка стабильности качества сортового проката посредством статистических методов контроля 54

1.5.6 Производство арматурного проката из непрерывнолитой заготовки посредством термоупрочнения 56

Выводы по разделу 64

**2 Описание объекта исследования** 66

2.1 Краткая характеристика СПЦ АО «АМТ» 66

2.2 Оборудование и технология МНС 320 66

2.3 Характеристика арматурного проката 69

Выводы по разделу 76

**3 Методики анализа данных** 77

3.1 Предварительная обработка опытных данных 77

3.1.1 Цель предварительной статистической обработки 77

3.1.2 Вычисление выборочных характеристик 77

3.1.3 Отсев ошибочных данных 80

3.1.4 Полигон и гистограмма частот распределения 82

3.1.5 Проверка гипотезы нормальности распределения 85

3.2 Анализ зависимостей в многомерных данных 87

3.2.1 Общие сведения 87

3.2.2 Расчет коэффициентов парной корреляции 88

3.2.3 Расчет параметров уравнения регрессии 89

3.2.4 Оценивание качества уравнения регрессии 91

3.2.5 Анализ остатков 94

3.3 Требования к исходным данным для статистического анализа 95

3.4 Оценка качества методами квалиметрии 96

3.4.1 Общие сведения 96

3.4.2 Принципы квалиметрии применительно к сортовому прокату 98

3.4.3 Определение дифференциальных показателей качества 100

3.4.4 Определение весомостей показателей качества 102

3.5 Методика компьютерного моделирования 103

3.5.1 Общие сведения 103

3.5.2 Выбор CAD-CAE программы для исследования и анализа 103

3.6 Методика металлографического анализа 105

3.6.1 Общие сведения 105

3.6.2 Приготовление микрошлифов 106

3.6.3 Травление микрошлифов 107

3.6.4 Оборудование оптической микроскопии 108

3.6.5 Методы определения величины зерна 108

Выводы по разделу 111

4 Металлографические исследования арматурной стали 112

4.1 Исследуемый материал и использованное оборудование 112

4.2 Микроструктура арматурного металла 114

Выводы по разделу 130

5 Статистический анализ производственных данных 131

5.1 Предварительная обработка опытных данных 131

5.2 Отсев ошибочных данных 133

5.3 Построение гистограммы частот распределения 135

5.4 Проверка нормальности распределения 136

5.4.1 Проверка по размаху варьирования 136

5.4.2 Проверка по асимметрии и эксцессу 138

5.4.3 Проверка по ϰ2-критерию Пирсона 139

5.5 Получение многофакторных регрессионных зависимостей 139

5.5.1 Расчет коэффициентов парной корреляции 139

5.5.2 Расчет параметров уравнения регрессии 141

5.5.3 Анализ остатков 143

5.6 Анализ полученных моделей 144

Выводы по разделу 144

**6 Квалиметрический анализ качества проката** 145

6.1 Качество арматурного проката из стали 35ГС 145

6.2 Качество арматурного проката из стали 25Г2С 150

6.3 Качество арматурного проката из стали Ст5пс 152

Выводы по разделу 154

**7 Моделирование прокатки арматурной стали 155**

7.1 Составление моделей арматуры и валка 155

7.2 Определение рациональной формы калибров 160

7.2.1 Выбор калибров для моделирования 160

7.2.2 Однорадиусный овал 162

7.2.3 Плоский овал с двойной вогнутостью 164

7.2.4 Гладкая бочка 166

Выводы по разделу 169

**8 Прокатка микролегированной арматурной стали 170**

8.1 Методика поведения работы 170

8.2 Прокатка арматуры из стали марки Ст5сп с микролегированием 171

8.2.1 Арматура №12 легированная ванадием 171

8.2.2 Арматура №16 легированная титаном 172

8.3 Производство термоупрочненной арматуры повышенной прочности 173

8.3.1 Арматура №12 из стали марки 35ГС 173

8.3.2 Арматура №22 из стали марки 25Г2С 177

Выводы по разделу 180

Заключение 181

Список использованных источников 183

Приложение А 190

Приложение Б

Приложение В

Приложение Г

Приложение Д

Приложение Е

**Нормативные ссылки**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 380–2005 Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. = Common quality carbon steel. Grades.

ГОСТ 535–2005 Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. = Common quality carbon steel bar and shaped sections. General specifications.

ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Steels and alloys. = Methods for detection and determination of grain size.

ГОСТ 5640-68 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты. = Steel. Metallographic method for determination of microstructure of sheets and bands

ГОСТ 5781–82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. = Hot-rolled steel for reinforcement of ferroconcrete structures. Specifications.

ГОСТ 6456-82 Шкурка шлифовальная бумажная. Технические условия. = Abrasive paper. Specifications.

ГОСТ 6727–80 Проволока из низкоуглеродистой стали холоднотянутая для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. = Cold-drawn low-carbon steel wire for reinforced concrete. Specifications.

ГОСТ 7348–81 Проволока из углеродистой стали для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций. = Carbon steel wire for reinforcement of prestressed concrete constructions. Specifications

ГОСТ 7566–94 Металлопродукция. Приемка, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. = Metal products. Acceptance, marking, packing, transportation and storage.

ГОСТ 10054-82 Шкурка шлифовальная бумажная водостойкая. Технические условия. = Waterproof abrasive paper. Specifications.

ГОСТ 10884–94 Сталь арматурная термомеханически упрочненная для железобетонных конструкций. Технические условия. = Thermomechanically hardened steel bars for reinforced concrete constructions. Specifications.

ГОСТ 14959–79 Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. Технические условия. = Spring carbon and alloy steel bars. Specifications.

ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. = Product quality control. Basic concepts. Terms and definitions.

ДСТУ 3760:2006 Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Общие технические условия. Национальный стандарт Украины. Киïв. Держспоживстандарт Украïни. 2007.

ГОСТ 21014–88 Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. = Rolled products of ferrous metals. Surface defects. Terms and definitions.

ГОСТ Р 52544-2006. Прокат арматурный свариваемый периодического профиля А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. = Weldable deformed reinforcing rolled products of A500C and B500C classes for reinforcement of concrete constructions. Specifications.

СТО АСЧМ 7–93 Стандарт ассоциации предприятий и организаций по стандартизации продукции черной металлургии. Прокат периодического профиля из арматурной стали.

ТИ СП 01-2014 Производство сортового проката на непрерывном сортовом стане. Технологическая инструкция. Стандарт предприятия.

ТУ 14-1-5372–99 Сталь холоднодеформированная периодического профиля для армирования железобетонных конструкций.

ТУ 14-170-217–94 Сталь холоднодеформированная с четырехсторонним периодическим профилем для армирования железобетонных конструкций.

ASTM A722/A 722M (2006) Standard Specification for Uncoated High-Strength Steel Bars for Prestressing Concrete = Стандартные технические требования к стальным стержням без покрытия высокой прочности для предварительного напряжения бетона. Стандарт США.

ASTM A 706/ A 706Ma (2009) Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement / Note: 3. revision 2009 = Стандартные технические требования для деформированных и простых стержней из низколегированной стали для армирования бетона / Примечание: 3. Пересмотр 2009). Стандарт США.

ASTM A 615/A 615Mb Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement / Note: 3. revision 2009 = Стандартные технические требования для деформированных и простых стержней из углеродистой стали для армирования бетона / Примечание: 3. Пересмотр 2009). Стандарт США.

BS 4449:2005+A2:2009 Steel for the reinforcement of concrete. Weldable reinforcing steel. Bar, coil and decoiled product. Specification. = Сталь для армирования бетона. Свариваемая арматурная сталь. Арматурный прокат, раскатанный и в бунтах. Технические условия. Стандарт Великобритании

DIN  448–1–1984 Reinforcing steels - Part 1: Grades, properties, marking = Армированная сталь. Часть 1. Сортамент, свойства, маркировка. Стандарт Германии.

DIN 488–3–2009 Reinforcing steels - Reinforcing steel in coils, steel wire = Армированная сталь. Часть 3. Армированная сталь в бухтах, стальной проволоке. Стандарт Германии.

DD ENV 10080:1996 Steel for the reinforcement of concrete. Weldable ribbed reinforcing steel B500. Technical delivery conditions for bars, coils and welded fabric = Сталь для железобетонной арматуры. Сталь арматурная свариваемая ребристая В 500. Технические условия на поставку прутков, рулонов и сварной сетки.

EN 10080:2005 Стальные изделия для армирования бетона. Стандарт Еврозоны.

ISO 6934–1.1991 Steel for the prestressing of concrete – Part 1: General requirements. (Сталь для предварительно напряженного бетона – Часть 1: Общие требования)

ISO 6935–2.2007 Steel for the reinforcement of concrete – Part 2: Ribbed bars. (Сталь для укрепления бетона – Часть 2: Ребристые стержни)

NСh 204–2006 Acero – Barras laminadas en caliente para hormigon armado = Steel – Hot rolled bars for reinforced concrete = Горячекатаные стержни для железобетона. Стандарт Чили.

NT 26.05 (1983) Арматурный профиль высокого сцепления с бетоном. Тунисская норма.

SI 4466 Сталь для армирования бетона. Стандарт Израиля.

STAS 438/1-89 Изделия из стали для армирования бетона. Горячекатаная арматурная сталь. Марки и технические требования к качеству. Стандарт Румынии.

**Определения**

В настоящей диссертации применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Арматурная сталь периодического профиля – стержни с равномерно расположенными на их поверхности под углом к продольной оси стержня поперечными выступами (рифлением) для улучшения сцепления с бетоном;

Аустенит – структура, представляющая собой твердый раствор углерода в -железе;

Бейнит – структура, состоящая из низкоуглеродистого мартенсита и частиц цементита (карбидов);

Величина зерна – это средняя величина случайных сечений зерен в плоскости металлографического шлифа;

Видманштеттова структура – дефект, образующийся в перегретой стали, заключающийся в том, что избыточный феррит (цементит) выделяется в виде сетки по границам зерен или в виде длинных пластин (игл), прорезающих зерна перлита;

Диаметр профиля – диаметр равновеликого по площади поперечного сечения круглого гладкого стержня;

Закаленный слой – глубина проникновения в поверхностный слой проката структуры отпущенного мартенсита, троостита или сорбита отпуска;

Зерна металлов – это отдельные кристаллы поликристаллического конгломерата, разделенные между собой смежными поверхностями, называемыми границами зерен;

Квалиметрия – отрасль науки, изучающая и реализующая методы количественной оценки комплексного качества продукции;

Класс прочности – установленное стандартом нормируемое значение физического или условного предела текучести стали;

Металлография – направление в металловедении, классический метод исследования и контроля металлических материалов, подготовка и изучение строения структуры шлифа обычно с помощью микроскопии;

Микроструктура – (от микро... и лат. structure - строение) строение материала (металла и сплавов), выявляемое с помощью микроскопа (оптического или электронного);

Микрошлиф – образец, поверхность которого подготовлена для микроанализа;

Паста ГОИ (от ГОИ — Государственный оптический институт) — шлифовальные и полировальные пасты на основе оксида хрома (III), используемые для шлифования и полирования стальных сплавов (в том числе термически упрочнённых), цветных металлов, твёрдых пластмасс и полимеров, стекла (в том числе оптического), керамических материалов и изделий из них.

Перлит – феррито-цементитная крупнодисперсная механическая смесь, имеющая, как правило, пластинчатое строение;

Предиктант – зависимая переменная (функция отклика, *У*) в уравнении регрессии;

Предиктор – независимая переменная (фактор, *Х*) в уравнении регрессии;

Самоотпуск – охлаждение проката на холодильнике перед упаковкой его в пачки ниже температуры превращения для получения более устойчивого структурного состояния металла.

Сорбит – феррито-цементитная структура, имеющая пластинчатое строение более дисперсное, чем перлит;

Сталь – твердый серебристо-белый металл, представляющий собою сплав железа (основа) с углеродом (до 2%) и другими примесями (металлами и металлоидами), вводимыми для нужных изменений свойств;

Термоупрочнение – деформация и последующая закалка с прокатного нагрева в душирующей установке;

Троостит – феррито-цементитная структура, имеющая пластинчатое строение более дисперсное, чем сорбит;

Феррит – структурная составляющая, твердый раствор углерода и легирующих элементов в -железе;

Цементит – структурная составляющая, химическое соединение Fe3C, карбид железа, фазовая и структурная составляющая железоуглеродистых сплавов; составная часть перлита, сорбита, троостита и ледебурита, а также продуктов отпуска стали.

**Обозначения и сокращения**

В настоящей диссертации использованы следующие обозначения и сокращения:

CAE (Computer-Aided Engineering) – общее название для программ или программных пакетов, предназначенных для инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов;

CAD (Computer Aided Design) – система автоматизированного проектирования (САПР) - программный пакет, предназначенный для создания чертежей, конструкторской и/или технологической документации и/или 3D моделей;

АИ – арматурные изделия;

АО «АМТ» – акционерное общество «АрселорМиттал Темиртау»;

ГОИ – Государственный оптический институт;

НД – нормативная документация;

ЖБК – железобетонные конструкции;

ЛИП – Лаборатория инженерного профиля;

МПа – Мегапаскаль;

НТД – нормативно-техническая документация;

ПАВ – поверхностно-активные вещества;

САО – среднее абсолютное отклонение;

СКО – среднее квадратическое отклонение;

, %– относительное остаточное удлинение;

F – критерий Фишера;

*kij* – дифференциальный показатель качества;

К0 – комплексный показатель качества;

R – размах варьирования параметра

*rmin* и *rmax* – минимальное и максимальное значение характеристики, установленное соответствующим стандартом;

S2 – дисперсия выборки;

͞S2 – несмещенная оценка дисперсии;

S – выборочное среднеквадратическое отклонение;

͞S – несмещенное выборочное среднеквадратическое отклонение;

t – критерий Стьюдента;

в, МПа – временное сопротивление разрыву;

т, МПа – физический предел текучести стали;

, % – коэффициент вариации;