

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.77.04

Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА COLD STRETCHING ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ КЛАССА 500 В УСЛОВИЯХ ОАО «ММК-МЕТИЗ»

Аннотация. Рассмотрен современный процесс производства ненапрягаемой арматурной проволоки класса 500, основанный на использовании знакопеременной деформации растяжения-сжатия COLD STRETCHING или «SBR». Описаны теоретические основы изменения механических свойств металла при применении механоциклической обработки. Представлен перечень предприятий, изготавливающих универсальные линии по производству арматуры, с помощью которых может быть реализована данная технология. Для теоретической оценки реализации данной технологии на линии LM-TRA/760-RO фирмы GCR Eurodraw было применено конечно-элементное моделирование с созданием цифрового двойника объекта и последующим анализом степени (интенсивности) деформации, необходимой для определения оптимальной конфигурации изгибающих роликов. Цифровой двойник обрабатываемого проката строился в программном пакете DEFORM 3D. В качестве точек контроля принималась точка после узла заправки и после панели окалиноматера, т.е. в местах наибольшего деформационного воздействия. Для построения модели использовался образец арматурного проката диаметром 12,0 мм из низкоуглеродистой стали. Принципиально определено, что для получения требуемых свойств арматуры значение интенсивности деформации должно быть в пределах 0,07-0,10. На примере арматурного проката диаметром 12,0 мм показано, что действующий состав оборудования может обеспечить проведение процесса COLD STRETCHING. Далее необходимо для каждого типоразмера арматурной проволоки провести теоретические расчеты, определяющие заданный уровень интенсивности деформаций и, соответственно, межосевое расстояние для роликов.

Ключевые слова: арматурная проволока, COLD STRETCHING, класс прочности 500, интенсивность деформации, конечно-элементное моделирование, цифровой двойник, конфигурация роликов, вытяжной барабан, закон Кулона-Амантона.

Введение

Ранее было показано [1], что одним из возможных способов получения арматурного проката класса прочности 500 с заданным уровнем свойств является технология «COLD STRETCHING» или «SBR» (stretching – bending – rebending). Согласно требованиям ГОСТ 34028 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия» условный предел текучести арматуры должен быть не менее 500 Н/мм², временное сопротивление разрыву не менее 600 Н/мм², отношение предела прочности к пределу текучести должно составлять не менее 1,05, относительное удлинение не менее 14%, полное относительное удлинение при максимальной нагрузке A_{gt} не менее 2,5%. Технология «COLD STRETCHING» основана на процессе пластической деформации — равномерного растяжения со знакопеременным изгибом без образования локализации деформации («шейки»). В процессе деформации горячекатаный прокат претерпевает упрочнение до класса 500, при этом пластические свойства металла должны сохраняться либо возможен их небольшой прирост [2]. Немонотонный характер изменения прочности и пластичности материалов при знакопеременной деформации исследуется достаточно давно [3–5], однако определяемые в результате теоретических расчетов и экспериментов зависимости не получают достаточного применения в производственной практике. Препятствием

для этого является многофакторность процессов управления и нестабильность качества готовых металлоизделий, связанная в основном с исходными свойствами заготовки. Процессы механоциклической обработки широко используются только в системах удаления окалины и в системах рихтовок, устанавливаемых перед намоткой готовых изделий (проволока, канаты) с целью устранения внутренних напряжений и придания равновесности виткам. Использование знакопеременной обработки как основного вида холодной деформации при производстве металлоизделий на сегодняшний день имеет крайне ограниченную сферу применения и недостаточно исследовано. Эта технология практически отсутствует на территории России, где в основном применяется традиционный способ изготовления арматуры протяжкой в роликовых волоках. Уникальность и простота данного способа значительно снижает затраты на производство, т.к. за счет малых степеней деформации происходит снижение затрат на трение, что влечет снижение энергетических затрат, кроме этого снижается нагрев в процессе, что исключает применение сложных и дорогостоящих систем охлаждения. Основным «тормозящим» моментом распространения данной технологии остается отсутствие единых расчетных закономерностей для выбора параметров процесса и низкая стабильность свойств готовой продукции.

В общем смысле под механоциклической обработкой понимается последовательное применение различных видов деформационного воздействия с изменением направления приложения сил, оказываю-

щее влияние на распределение внутренних напряжений в металле [3]. Этот процесс производится в роликовых системах различной конфигурации с применением принудительного вытяжения на тянущий барабан. Такая деформационная обработка не снижает плотность дислокаций в деформированной заготовке, а перераспределяет, изменяя дислокационную структуру. Основной принцип процессов с комбинированным нагружением состоит в разделении в произвольной пропорции общего потока энергии подводимой к деформируемому телу энергии. Исследования по воздействию циклической деформации на свойства металла показывают, что развитие применения таких способов воздействия может быть гораздо более эффективным в способах управления качеством, чем это принято считать на сегодняшний день.

Современные европейские предприятия, специализирующиеся на изготовлении оборудования для производства проволоки, представляют универсальные линии для изготовления арматуры, включающие не только традиционный состав оборудования с роликовыми клетями, но и специальные панели для применения технологии «COLD STRETCHING» в одной технологической линии (Promostar Srl (<https://www.promostar.it/>), SCHNELL spa (<https://www.schnellgroup.com/en/>), DEM (<https://www.demgroup.com/>) и пр.). В качестве накопительного устройства обычно служит окалиноломатель, в котором происходит удаление окалины с поверхности посредством знакопеременного изгиба в двух взаимно перпендикулярных группах роликов. При использовании процесса «COLD STRETCHING» окалиноломатель одновременно выполняет функцию создания обратного натяжения арматурной проволоки между роликами и тянущим барабаном, и изгибающей системы.

Цель настоящей работы состоит в теоретической оценке возможности осуществления процесса «COLD STRETCHING» на линии LM-TRA/760-RO фирмы GCR Eurodraw [<http://gcreurodraw.com/>], предназначенной для производства холоднодеформированной арматуры из низкоуглеродистых марок стали в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ». В качестве исходных условий принималась существующая конфигурация роликовых устройств данной линии – узла заправки и механического окалиноломателя, которые обеспечивали реализацию технологии «COLD STRETCHING» по схеме «изгибающие ролики – вытяжной барабан».

Теория, материалы и методы исследования

Для проведения исследования возможности практического применения технологии «COLD STRETCHING» были проведены следующие физические и компьютерные эксперименты:

- физическое, а затем конечно-элементное моделирование процесса растяжения арматурного проката класса 400 на разрывной машине и определение интенсивности деформации ε_u , необходимой для обеспечения требуемого прироста прочностных и пластических свойств без образования зоны локальной деформации;

- конечно-элементное моделирование процесса механоциклической обработки (растяжения со знакопеременным изгибом) на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw при существующей конфигурации роликовых устройств, изменяя только межосевое расстояние между роликами, для получения заданной величины ε_u .

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного физического эксперимента процесса растяжения образца арматурного проката класса 400 диаметром 8,0 мм из стали марки 18Г2С на разрывной машине было установлено, что требуемый комплекс физико-механических свойств был достигнут при величине относительного удлинения образца δ_1 . При компьютерном моделировании процесса растяжения этого же образца в программном пакете DEFORM 3D (лицензия: Machine 38808) при тех же условиях, что и физический эксперимент, были приняты следующие граничные условия для моделирования:

- модель материала пластическая, реология материала образца принята из ранее полученных в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» экспериментов;
- скорость деформации 0,01 м/с;
- перемещение захватов испытательной машины (относительное удлинение) образца, равное величине δ_1 .

В результате моделирования определили интенсивность деформации образца ε_u при описанных выше условиях, значение которой составило $\varepsilon_u = 0,07$. Таким образом, интенсивность деформации для реализации технологии «COLD STRETCHING» принимаем равной $\varepsilon_u = 0,07-0,1$. Причём заданная величина ε_u должна обеспечиваться не только на поверхности, но и в центральных слоях образца.

На следующем этапе организовывался компьютерный эксперимент по созданию цифрового двойника технологии «SBR» применительно к линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw с конфигурацией роликов, показанных на рис. 1. Задачей компьютерного эксперимента было определение такой конфигурации роликов за счёт изменения параметра h , которое обеспечивало бы получение значения интенсивности деформации ε_u^0 (на оси проката) равно 0,07. Моделирование было проведено для значений $h = 192$ мм (исходная конфигурация роликов), $h = 187$ мм (уменьшение межосевого расстояния на 5 мм); $h = 182$ мм (уменьшение межосевого расстояния на 10 мм); $h = 178$ мм (уменьшение межосевого расстояния на 14 мм).

Граничные условия для конечно-элементного моделирования принимались следующие:

- диаметр проката 12,0 мм выбран, для примера, как наиболее «ходовой», модель материала пластическая, реология материала образца принята из ранее полученных в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» экспериментов;

- материал роликов — абсолютно жёсткое тело;
- коэффициент трения принимался равным 0,1 по Кулону-Амонтону.

На рис. 2 показана исходная компьютерная модель (цифровой двойник) объекта.

Интенсивность деформации проката ϵ_u оценивалась после узла заправки PW150 – точка контроля 1 (рис. 3), а также после роликов окалиноломателя RD140 – точка контроля 2 в центральных слоях сечения (положение относительно оси проката «0») и по-

верхностных слоях (положение относительно оси проката «r»).

Сводные результаты компьютерного эксперимента приведены в таблице.

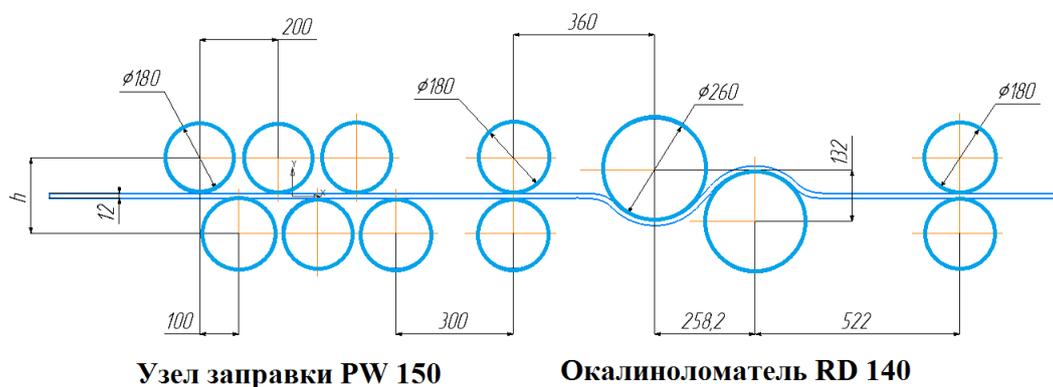


Рис. 1. Конфигурация роликов линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw (узел заправки и окалиноломатель)

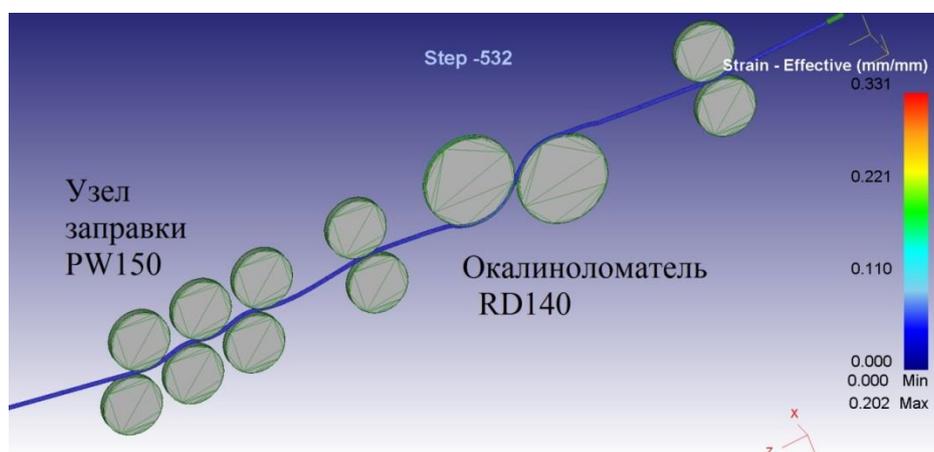


Рис. 2. Цифровой двойник обрабатываемого проката в программном пакете DEFORM 3D

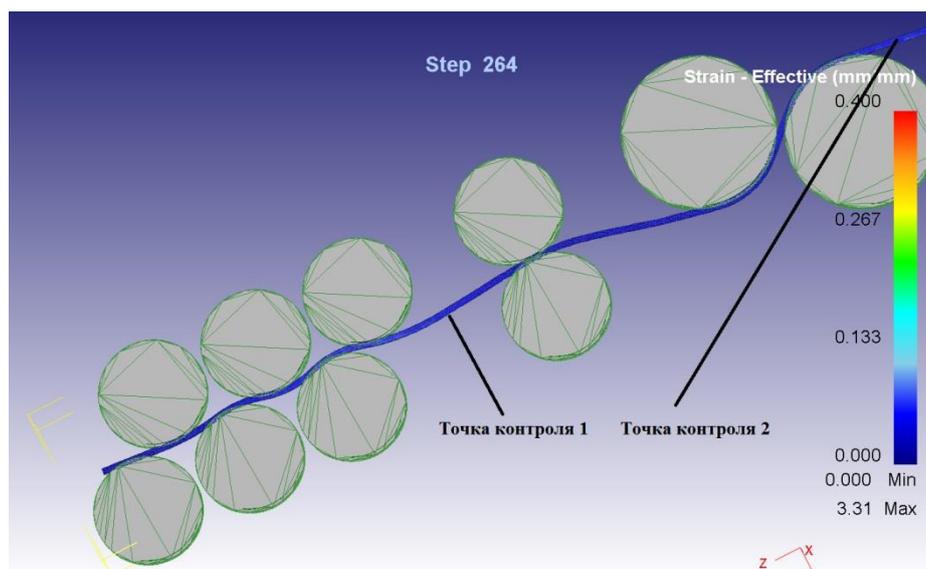


Рис. 3. Точки контроля показателя интенсивности деформации

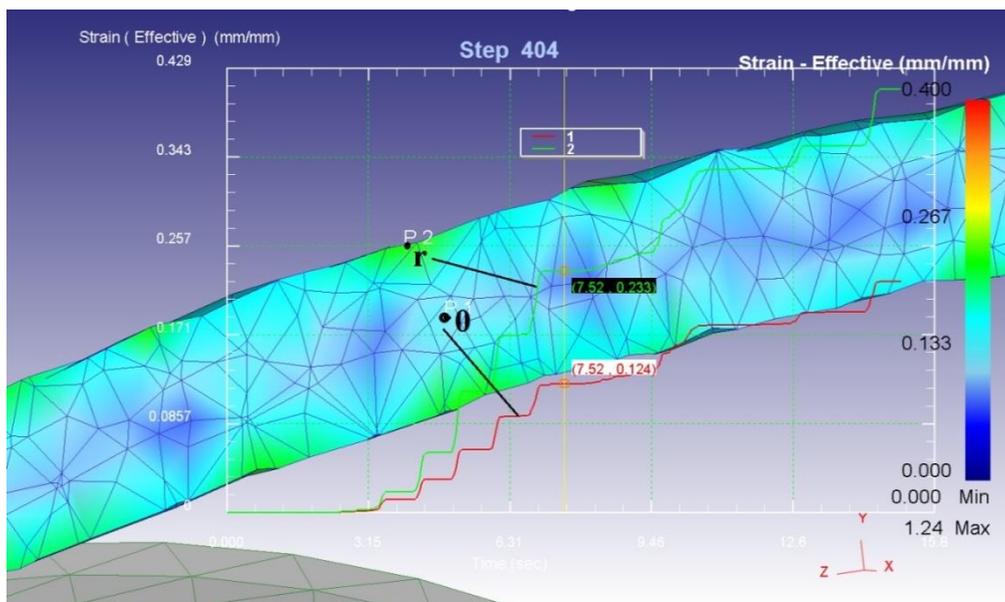


Рис. 4. Интенсивность деформации ϵ_u на центральной оси сечения (положение «0») и в поверхностных слоях (положение «r») для межосевого расстояния между роликами $h = 182$ мм в точке контроля 1 ($\epsilon_u^r = 0,23$; $\epsilon_u^0 = 0,12$)

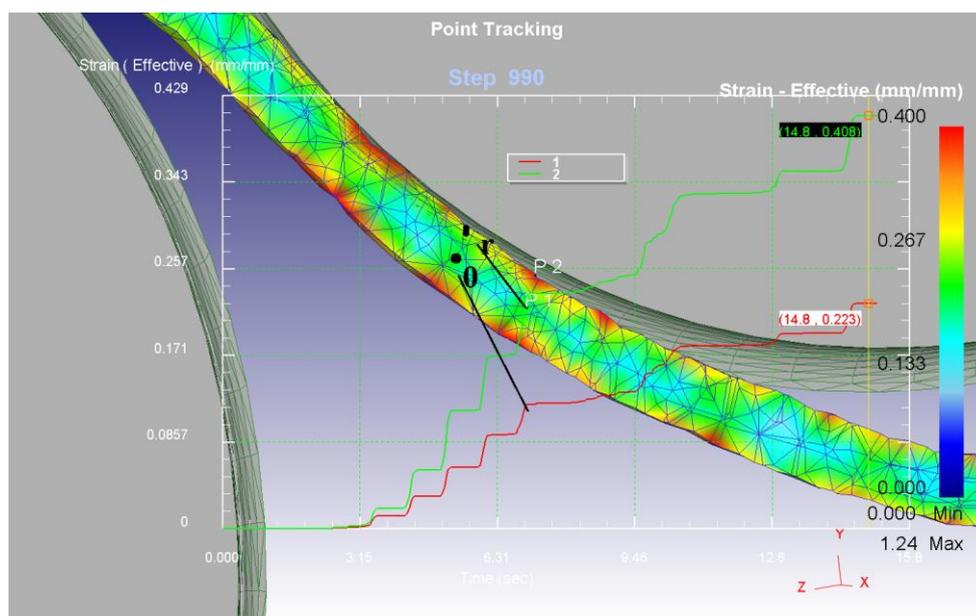


Рис 5. Интенсивность деформации ϵ_u на центральной оси сечения (положение «0») и в поверхностных слоях (положение «r») для изменения межосевого расстояния между роликами $h = 182$ мм в точке контроля 2 ($\epsilon_u^r = 0,40$; $\epsilon_u^0 = 0,23$)

Результаты компьютерного моделирования технологии COLD STRETCHING при изготовлении арматурного проката на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw

Точки контроля	Межосевое расстояние между роликами, мм							
	$h=192$		$h = 187$		$h = 182$		$h = 178$	
	Положение относительно оси проката							
	0	r	0	r	0	r	0	r
Показатель интенсивности деформации ϵ_u								
	ϵ_u^0	ϵ_u^r	ϵ_u^0	ϵ_u^r	ϵ_u^0	ϵ_u^r	ϵ_u^0	ϵ_u^r
1	0,002	0,01	0,10	0,18	0,12	0,23	0,14	0,30
2	0,09	0,26	0,21	0,34	0,23	0,40	0,21	0,46

Заключение

В результате конечно-элементного моделирования технологии COLD STRETCHING при изготовлении арматурного проката на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw установлено:

1. На примере арматурного проката диаметром 12,0 мм показано, что технология COLD STRETCHING на линии LM-TRA/760-RO GCR Eurodraw концептуально может быть реализована при существующей схеме прохождения проката (узел заправки PW150 – окалиноломатель RD140 – вытяжное устройство).

2. Для получения требуемого комплекса механических свойств проката диаметром 12,0 мм при существующей на линии конфигурации расположения роликовых устройств после узла правки PW150 необходимо установить межосевое расстояние между роликами узла правки PW150 187 мм, поскольку этого достаточно, чтобы на оси проката обеспечивалась интенсивность деформации $\varepsilon_u^0 = 0,07$.

3. Дальнейшие работы должны быть направлены на определение требуемого межосевого расстояния узла правки PW150 для других диаметров арматурного проката с целью обеспечения интенсивности деформации $\varepsilon_u^0 = 0,07$.

Сведения об авторах

Столяров Алексей Юрьевич – кандидат технических наук, главный специалист по технологии, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru.

Зайцева Мария Владимировна – кандидат технических наук, главный специалист по исследовательской работе, ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод», Магнитогорск, Россия. E-mail: zaitseva.mv@mmk-metiz.ru.

Столяров Федор Алексеевич – студент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. E-mail: stolyrov.f.a@yandex.ru.

Список литературы

1. Стратегия развития металлургического производства арматурного проката классов прочности 500 и 600 Н/мм² в соответствии с техническими требованиями ГОСТ 34028-2016 на основе использования качественных сталей и совершенствования технологии производства. Предложения АО «НИЦ «Строительство». Москва, 2017.
2. Патент 2608927 РФ. Арматурный прокат для изготовления металлических сеток и каркасов / В.А. Харитонов, А.И. Звездов, С.В. Снимщиков, И.Н. Суриков, И.П. Саврасов, А.В. Харитонов. Оpubл. 26.01.2017. Бюл. №3.
3. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. М.: МГУ, 1965. 266 с.
4. Грачев С.В. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. М.: Металлургия, 1976. 152 с.
5. Черняк Н.И., Гаврилов Д.А. Сопротивление деформированию металлов при повторном статическом нагружении. Киев: Наукова Думка, 1971. 135 с.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FINITE-ELEMENT MODELING OF THE COLD STRETCHING PROCESS TO ASSESS THE POSSIBILITY OF MANUFACTURING METIZ COLD-DEFORMED REINFORCING BARS OF CLASS 500 IN THE CONDITIONS OF JSC«MMK-METIZ»

Stolyarov Aleksey Yu. – candidate of engineering sciences, chief technologist at JSC«MMK-METIZ», Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Zaitseva Maria V. – candidate of engineering sciences, chief research officer at JSC«MMK-METIZ», Magnitogorsk, Russia. E-mail: zaitseva.mv@mmk-metiz.ru

Stolyarov Fedor A. – student of materials treatment technologies department of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: stolyrov.f.a@yandex.ru.

Annotation. The modern process of production of non-tensioned reinforcing wire of class 500 based on the use of alternating tensile-compression deformation COLD STRETCHING or "SBR" is considered. The theoretical foundations of the change in the mechanical properties of metal when using mechanocyclic processing are described. A list of enterprises that manufacture universal lines for the production of valves is presented, with the help of which this technology can be implemented. To theoretically evaluate the implementation of this technology on the LM-TRA / 760-RO

line of GCR Eurodraw, finite element modeling was applied with the creation of a digital twin of the object and subsequent analysis of the degree (intensity) of deformation required to determine the optimal configuration of the bending rollers. The digital twin of the rolled steel being processed was built in the DEFORM 3D software package. The point after the filling unit and after the scalebreaker panel, i.e., in the places of the most deformation effect, were taken as control points. To build the model, a sample of reinforcing bars with a diameter of 12.0 mm from low-carbon steel was used. It is fundamentally determined that in order to obtain the required properties of the reinforcement, the value of the deformation intensity should be in the range of 0.07-0.10. Using the example of reinforcing bars with a diameter of 12.0 mm, it is shown that the existing composition of the equipment can provide the COLD STRETCHING process. Further, it is necessary for each standard size of reinforcing wire to carry out theoretical calculations that determine the specified level of deformation intensity, and, accordingly, the center distance for the rollers.

Keywords: reinforcement wire, COLD STRETCHING, strength class 500, strain rate, Finite-element modeling, digital twin, roller configuration, drawing drum, Coulomb-Amontons' law.

Ссылка на статью:

Столяров А.Ю., Зайцева М.В., Столяров Ф.А. Конечно-элементное моделирование процесса COLD STRETCHING для оценки возможности изготовления холоднодеформированной арматуры класса 500 в условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» // Теория и технология металлургического производства. 2021. №1 (36). С. 21-26.

Stolyarov A.Yu., Zaitseva M.V., Stolyarov F.A. Finite-element modeling of the COLD STRETCHING process to assess the possibility of manufacturing metiz cold-deformed reinforcing bars of class 500 in the conditions of JSC«ММК-МЕТИЗ». *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2021, vol. 36, no. 1, pp. 21-26.