



УДК 621.778

**А.Г. Корчунов, Д.В. Константинов, Е.М. Огнева**  
ФГБОУ ВО Магнитогорский государственный  
технический университет им. Г.И. Носова  
г. Магнитогорск, Россия  
E-mail: agkorchunov@mail.ru

**А.Ю. Столяров**  
ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный  
завод «ММК-МЕТИЗ»  
г. Магнитогорск, Россия  
E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru  
Дата поступления: 25.10.2023

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРОБЕМЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНОГО СОРТОВОГО ПРОКАТА

### Аннотация

Дробеметная обработка, в качестве экологически чистого способа удаления окалины с поверхности горячекатаного проката, имеет значительный потенциал в технологиях поточной обработки калиброванной стали для машиностроения. Основной причиной, снижающей ее эффективное применение, является сложность процесса из-за различных параметров, которые необходимо одновременно контролировать для достижения баланса между степенью очистки поверхности от окалины, локальным разогревом, характером напряженно-деформированного состояния и эффектами упрочнения поверхностного слоя, параметрами шероховатости поверхности и стабильностью последующего волочения.

В настоящей работе представлена компьютерная конечно-элементная модель обработки поверхности горячекатаного проката дробью. По результатам моделирования, на примере процесса обработки поверхности горячекатаного проката из стали марки 20 дробью сферической формы, определены параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя с учетом обезуглероженного слоя и основного металла, а также параметры шероховатости поверхности. Полученные данные, позволят определять режимы волочения с учетом характера напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя горячекатаного проката и микрорельефа его поверхности после дробеметной обработки.

**Ключевые слова:** сортовой прокат, дробеметная обработка, поверхность, компьютерное моделирование, параметры шероховатости, напряженно-деформированное состояние.

### Введение

В технологических процессах производства калиброванной стали методом холодного волочения в качестве исходной заготовки широко используется горячекатаный сортовой прокат [1].

Современные технологии калиброванной стали базируются на экологически чистом и высокопроизводительном оборудовании модульного типа, объединяющим в едином потоке операции обработки поверхности горячекатаного проката дробью

с целью удаления окалины, холодной пластической деформации методом волочения и правки [2].

Опыт освоения технологических линий показал, что основные резервы технологии производства связаны с учетом особенностей состояния поверхности горячекатаного проката после обработки дробью, что напрямую влияет на стабильность процесса волочения и качество готовой продукции. Особенности процесса волочения металла после дробеметной обработки связаны как с состоянием поверхностного слоя, так и отсутствием традиционных операций по нанесению подмазочного слоя

для улучшения захвата смазочных материалов и нагнетания в очаг деформации [3].

Для обработки поверхности дробью используют рабочие тела из различных материалов. Кроме стальных полированных шариков, стальной и чугунной дроби применяют также металлическую сечку из проволоки, гранулы из алюминиевых и цветных сплавов, литые металлические звездочки, природные материалы. Основные параметры обработки дробью: материал и форма дроби, скорость полета дроби, кинематическая энергия летящей дроби, время воздействия дроби на обрабатываемую поверхность, расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности, угол и диаметр факела дроби [4].

Исследователи из университета Örebro University (Швеция) схематически

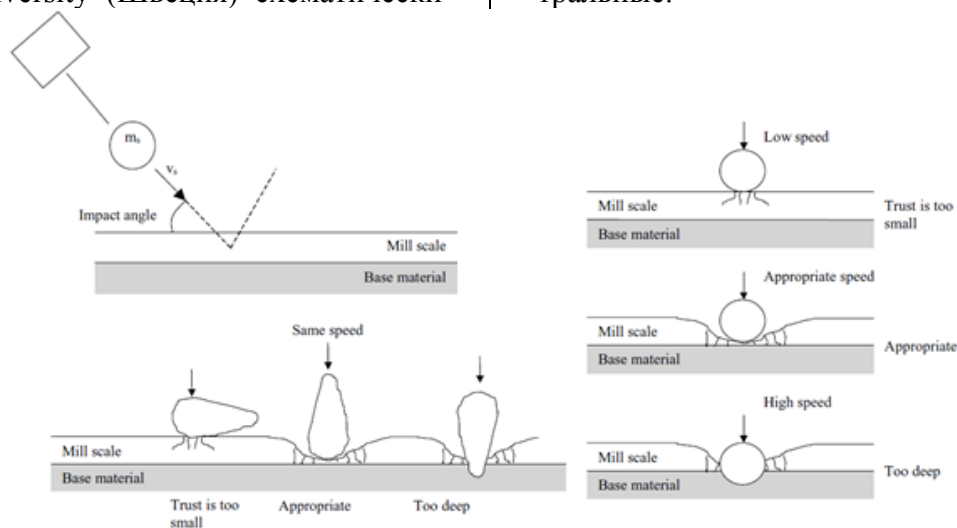


Рисунок 1. Механизмы взаимодействия дроби с поверхностью металла при удалении окалины [5]

В работе [6] представлены результаты проведения очистки поверхности проката из стали марок 38, 48, 41ХА на дробеметных установках зарубежных фирм «Roesler» и «Wheelabrator». Размеры круглых и шестигранных прутков варьировались от 11 до 62 мм и соответствовали сортаменту изготовления холоднотянутого проката методом волочения. Исследования показали, что на поверхности проката от удара дроби в виде небольших от 0,6 до 1,0 мм шарообразных частиц хорошо просматриваются углубления до 0,1 мм. Каждый удар дроби вызывает деформацию поверхности металла. Под обработанной поверхностью формируется упрочненный слой.

изобразили влияние основных параметров обработки поверхности металла дробью на механизм их взаимодействия (рисунок 1) [5]. От размера и формы дроби зависит степень влияния на обрабатываемую поверхность. Например, при одинаковой скорости обработки 73 м/с дробь размером 0,2 мм удаляет до 98% окалины с поверхности металла, а дробь большего диаметра 0,3 мм удаляет только 75% окалины. Дробь сферической формы формирует на обрабатываемой поверхности преимущественно впадины при меньшей глубине. Дробь угловатой или заостренной формы формирует микрорельеф поверхности из глубоких впадин, при этом мелкие частицы дроби могут глубоко проникать не только в приповерхностные слои металла, но и в околоцентральные.

Остатки таких микроскопических углублений остаются на поверхности проката и после волочения, но их незначительная глубина до 0,07 мм и расположение на поверхности прутков не выходят за рамки требований. Удары дробью приводят к более высоким значениям шероховатости поверхности по сравнению с шероховатостью травленого проката.

По данным авторов исследования [7], после дробеметной обработки прокат характеризуется значительно более развитым микрорельефом поверхности по сравнению с горячекатаным состоянием (рисунок 2).

В работе [8] на примере дробеметной обработки поверхности проката стали

марки 35 показано, что она приводит к существенному повышению значений высотных параметров шероховатости поверхности. По сравнению с исходным состоянием поверхности горячекатаного проката параметр Ra увеличил свое значение в 1,4 раза,

параметр Rz – в 1,34 раза. При этом параметр Rp (самые высокие пики) увеличился в 1,74 раза, параметр Rv (самые глубокие впадины) увеличил свое значение незначительно в 1,07 раза.

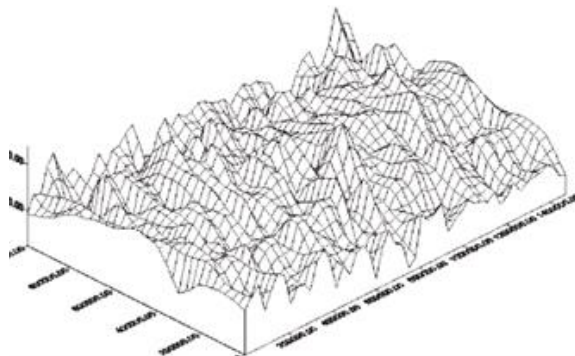


Рисунок 2. 3D-диаграмма поверхности металла после дробеметной обработки [7]

Несмотря на то, что дробеметная обработка является достаточно известным способом, большинство компаний не могут использовать ее наиболее эффективным образом в технологиях производства калиброванной стали и реализовать в полной мере ее преимущества из-за различных параметров, которые необходимо одновременно контролировать для достижения баланса между степенью очистки поверхности от окалины, локальным разогревом, характером напряженно-деформированного состояния и эффектами упрочнения поверхностного слоя, параметрами шероховатости поверхности и стабильностью последующего волочения [3, 9, 10].

При этом дробеметная обработка имеет значительный потенциал по управлению формированием заданного микрорельефа поверхности горячекатаного проката с необходимыми соотношениями параметров шероховатости поверхностного слоя, обеспечивающие надежный захват и нагнетание смазочного материала в очаг деформации.

В свою очередь это диктует необходимость проведения наукоемких исследований напряженно-деформированного состояния, микрорельефа и микроструктуры поверхностных слоев горячекатаного проката после обработки дробью.

Целью данного исследования является разработка компьютерной конечно-элементной модели обработки поверхности

горячекатаного проката дробью для последующего определения режимов волочения с учетом напряженно-деформированного состояния и микрорельефа поверхности.

### Основная часть

Модель обработки поверхности дробью строилась и в последующем верифицировалась на основании параметров Rp (высота наибольшего выступа профиля шероховатости в пределах базовой длины) и Rv (глубина наибольшей впадины профиля шероховатости в пределах базовой длины) по ГОСТ ИСО 4287-2014. Образцы горячекатаного проката и образцы после дробеметной обработки отбирались на линии производства калиброванной стали CDS 300/80 в условиях ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ».

Определение параметров микрорельефа поверхности образцов осуществлялось на профилометре MarSurf XR20 with XT20 (Mahr, Германия). Образцы горячекатаного проката стали марки 20 диаметром 14,0 мм до дробеметной обработки имели следующие абсолютные значения параметров: Rp = 9,08 мкм, Rv = 9,61 мкм. Диаметр одной дроби имел значение 0,45 мм.

На основании этого в программном пакете Simulia Abaqus была построена конечно-элементная модель дробеметной обработки поверхности горячекатаного проката. Модель содержала 46057 элементов и

24000 узлов. Модели дроби являлись абсолютно жесткими телами. Форма дроби принималась сферической. Направление движения дроби к поверхности – перпендикулярное. Скорость составляла 65м/с.

При моделировании был учтен обезуглерожженный слой величиной 100 мкм на поверхности горячекатаных образцов [2], посредством присвоения поверхности модели свойств чистого феррита. Свойства основного металла наделялись свойствами стали марки 20.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния микрорельефа поверхности после удара и полной остановки дробинки представлены на рисунках 3-7.

Распределение напряжений Мизеса (рисунок 3), что интенсивность напряжений в обезуглерожженном слое численно равна 550-470 МПа и распределена равномерно по всей его толщине. На границе перехода в слой со свойствами стали марки 20 интенсивность напряжений резко падает и снижается до значений 380-300 МПа.

Распределение напряжений по оси У (рисунок 4) показало, что в области соударения дроби с поверхностью заготовки создается равномерно распределенное напряжение сжатия величиной 560-650 МПа.

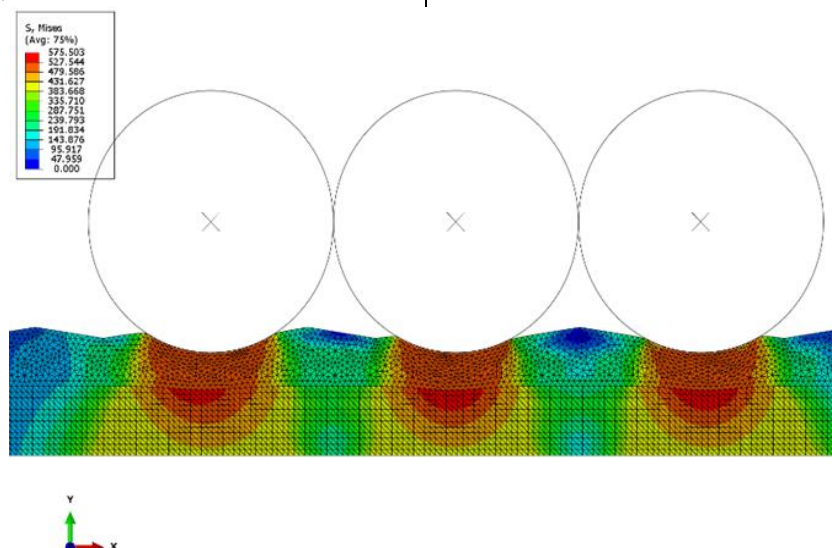


Рисунок 3. Распределение напряжений Мизеса вследствие удара дробью по микрорельефу поверхности образцов

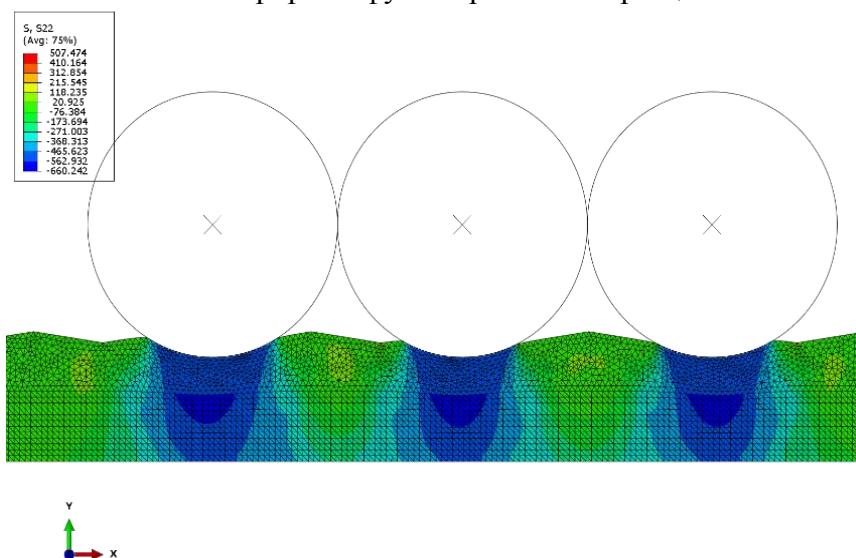


Рисунок 4. Распределение напряжений по оси У вследствие удара дробью по микрорельефу поверхности образцов

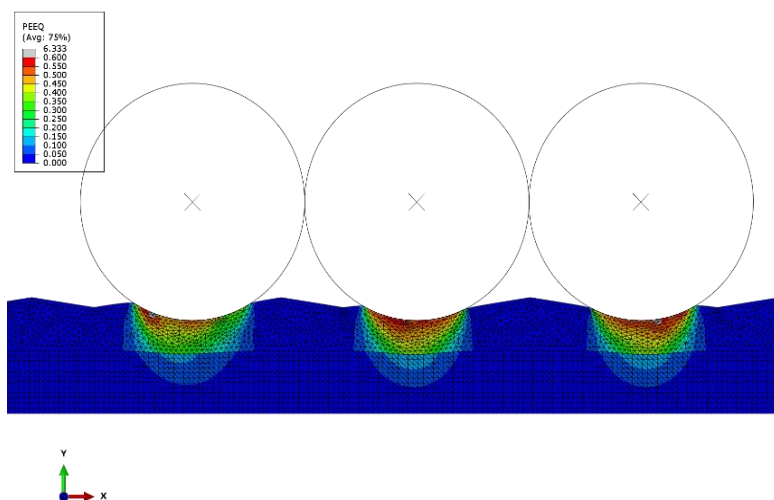


Рисунок 5. Распределение эквивалентных деформаций вследствие удара дробью по микрорельефу поверхности образцов

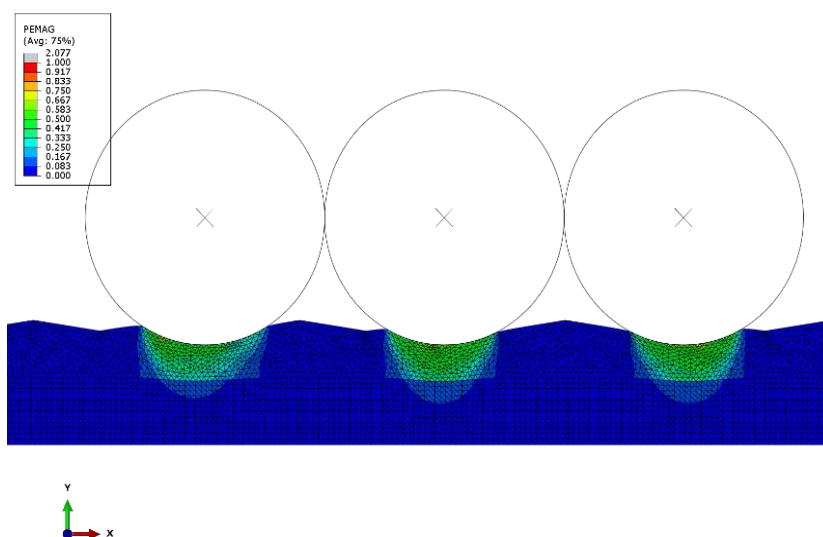


Рисунок 6. Распределение величин пластической деформации вследствие удара дробью по микрорельефу поверхности образцов

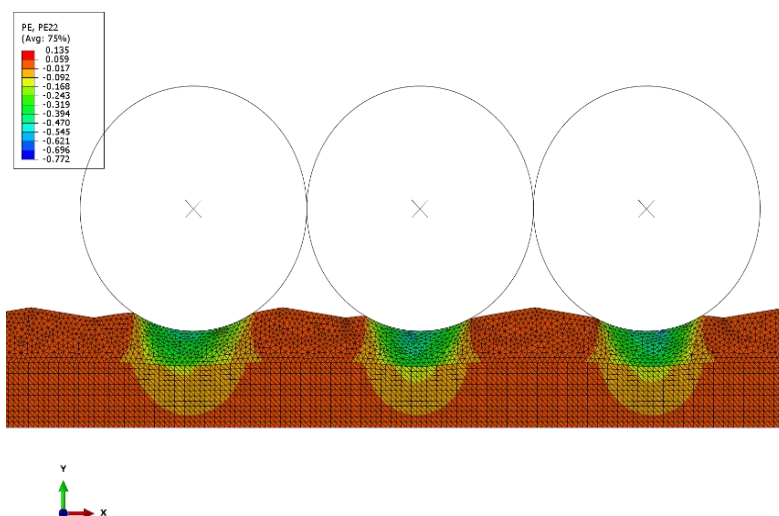


Рисунок 7. Распределение деформаций по оси У вследствие удара дробью по микрорельефу поверхности образцов

Однако, как показывает распределение эквивалентных деформаций, данного уровня напряжений недостаточно для деформирования основного металла, и деформация локализуется исключительно в обезуглероженном слое (рисунок 5).

Распределение деформаций по оси У представляет собой плавный градиент деформаций сжатия от значения 0.47 на поверхности микрорельефа до значения 0.09 вблизи перехода в слой со свойствами стали марки 20 (рисунок 7). Основной ме-

талл образцов при этом деформируется незначительно, деформация сжатия составляет значение 0.017. Данные моделирования подтверждаются результатами исследования микротвердости поверхностных и приповерхностных областей образцов после дробеметной обработки [8].

На основе результатов моделирования были проанализированы параметры микрорельефа поверхности горячекатаного проката после дробеметной обработки (таблица 1).

Таблица 1

Значения параметров микрорельефа поверхности горячекатаного проката

Параметр шероховатости поверхности, мкм	Поверхность горячекатаного проката	Поверхность после дробеметной обработки	
		Данные экспериментальных измерений	Данные моделирования
Rp	9,08	12,07	14,18
Rv	9,61	11,55	12,30

Максимальное расхождение данных, полученных по результатам моделирования с данными измерения параметров шероховатости поверхности не превышает 17,5 %. Следовательно, можно сделать вывод о потенциально высокой сходимости результатов моделирования с измерениями на экспериментальных образцах, подвергнутых дробеметной обработке в производственных условиях.

### Заключение

1. Дробеметная обработка, используемая для удаления окалины, имеет значительный потенциал в технологиях поточной обработки калиброванной стали. Основной причиной, снижающей ее эффективное применение, является сложность процесса из-за различных параметров, которые необходимо одновременно контролировать для достижения баланса между степенью очистки поверхности от окалины, локальным разогревом, характером напряженно-деформированного состояния и эффектами упрочнения поверхностного слоя, параметрами шероховатости поверхности и стабильностью последующего волочения.

2. Представлена компьютерная конечно-элементная модель обработки поверхности горячекатаного проката дробью. По результатам моделирования, на примере процесса обработки дробью поверхности горячекатаного проката из стали марки 20, определены параметры напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя с учетом обезуглероженного слоя и основного металла, а также высота наибольшего выступа профиля шероховатости в пределах базовой длины Rp и глубина наибольшей впадины профиля шероховатости в пределах базовой длины Rv. Максимальное расхождение данных, полученных по результатам моделирования с данными измерения параметров шероховатости поверхности не превышает 17,5 %.

3. Развитие модели и повышение точности прогнозирования позволит проектировать результативные режимы волочения с учетом реального строения и характера напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя горячекатаного проката и микрорельефа его поверхности после дробеметной обработки.



## Библиографический список

1. Кандауров Е.Л., Кривошеков С.В., Носов А.Д. и др. Перспективы производства калиброванного проката // Сталь. 2005. № 1. С. 70 – 71.
2. Столяров А.Ю., Соколов А.А. ММК-МЕТИЗ – новые технологические решения и развитие производства // Механическое оборудование металлургических заводов. 2022. № 1 (18). С. 4 – 10.
3. Канаев Д.П., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г., Константинов Д.В., Зайцева М.В. Особенности проектирования режимов волочения калиброванного проката после дробеметной обработки поверхности // Заготовительные производства в машиностроении. - № 5. – 2022. – С. 223-229.
4. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987, 328 с.
5. P.Gillström, M. Jarl. Replacement of pickling with shot blasting for wire rod preparation // Scandinavian Journal of Metallurgy.- 2004.- Vol.33 p. 269–278.
6. Жуков Д.В., Статных И.Е. Удаление окалины с поверхности горячекатаного проката перед волочением // Сталь. - № 1. – 2021. – С.36-38
7. D.Kniewald, J. Brezinova, A.Guzanova. The Study of Material Changes in Shot Blasting Process Communications - Scientific Letters of the University of Zilina 2004, 6(2), pp.37-42.
8. Канаев Д.П., Столяров А.Ю., Корчунов А.Г., Огнева Е.М. Анализ изменения поверхностного слоя проката после дробеметной обработки и волочения // Сталь. - № 4. – 2023. – С.24-27.
9. Влияние режимов дробеметной обработки поверхности подката и смазочного материала на силовые характеристики волочения стали / В.М. Грешнов, А.В. Боткин, В.Ю. Шолом, Д.М. Закиров // Кузнечно-штамповочное производство. - 2000. № 12. - С. 16-20.
10. Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and workhardening / V. Llaneza, F.J. Belzunce // Applied Surface Science. – 2015. - № 356. 475–485 pp.

---

### Information about the paper in English

**A.G. Korchunov, D.V. Konstantinov, E.M. Oгнева**

Nosov Magnitogorsk State Technical University  
Magnitogorsk, Russia

E-mail: agkorchunov@mail.ru

**A.Yu. Stolyarov**

OJSC Magnitogorsk Metalware and Sizing Plant (MMK-METIZ)  
Magnitogorsk, Russia

E-mail: stolyarov.ay@mmk-metiz.ru

Receipt date: October 25, 2023

---

## MODELING OF SHOT BLASTING SURFACE TREATMENT OF HOT-ROLLED BARS

### Abstract

Shot blasting, as an environmentally friendly method for removing scale from the surface of hot-rolled steel, has significant potential in technologies for continuous processing of calibrated steel for mechanical engineering. The main reason that reduces its effective use is the complexity of the process due to various parameters that must be simultaneously controlled to achieve a balance between the degree of surface descaling, local heating, the nature of the stress-strain state and the effects of hardening the surface layer, surface roughness parameters and stability subsequent drawing.

This paper presents a computer finite element model of surface treatment of hot-rolled steel with shot. Based on the modeling results, using the example of the process of surface treatment of hot-rolled steel grade 20 with spherical shot, the parameters of the stress-strain state of the surface layer were determined, taking into account the decarburized layer and the base metal, as well as the parameters of surface roughness. The data obtained will make it possible to determine drawing modes taking into account the nature of the stress-strain state of the surface layer of hot-rolled steel and the microrelief of its surface after shot blasting.

**Keywords:** long products, shot blasting, surface, computer modeling, roughness parameters, stress-strain state.

---