

УДК 538.911

DOI: 10.26896/1028-6861-2017-83-31-35

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОЛОСЫ АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ НА ЕЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА¹

© В. В. Губернаторов², Т. С. Сычева², С. А. Ольков³*Статья поступила 15 февраля 2017 г.*

Исследовали геометрию (в основном шероховатость поверхности) холоднокатаных полос анизотропной электротехнической (трансформаторной) стали (технического магнитомягкого ОЦК сплава Fe – Si с ребровой кристаллографической текстурой (110)[001]) и ее влияние на магнитные свойства материала (в частности, на электромагнитную индукцию B_{800} и удельные магнитные потери $P_{1,7/50}$). Установлено, что на поверхности стальных полос при холодной прокатке на конечную толщину 0,23 – 0,30 мм с обжатием 50 – 70 % образуются гофры. Как правило, их гребни и впадины располагаются перпендикулярно направлению прокатки и имеют волнообразную форму. Образование такого рельефа обусловлено градиентом напряженно-деформированного состояния по сечению полосы и стесненностью течения ее поверхностных слоев в конце очага деформации и неизбежно сопутствует процессу прокатки. Наличие гофров, как и любой другой шероховатости, на поверхности полосы снижает B_{800} и повышает $P_{1,7/50}$. Предложено устранять дефекты поверхности холоднокатаной стальной полосы (в том числе и гофров) и получать гладкую поверхность за счет проглаживания, которое можно осуществлять протяжкой (волочением) полос с небольшим обжатием (~3 %) на станах холодной прокатки при отключенном приводе рабочих валков с помощью моталок. Включение операции волочения в технологическую схему производства трансформаторной стали улучшает ее магнитные свойства за счет повышения совершенства кристаллитов (зерен), остроты ребровой текстуры и устранения препятствий для движения границ магнитных доменов при ее перемагничивании. Проглаживание стальных полос нитридно-медного способа плавки (ингибиторы — дисперсные частицы AlN и CuMn₂O₄) толщиной 0,30 мм повысило B_{800} до 1,93 Тл и снизило $P_{1,7/50}$ до 1,07 Вт/кг (улучшение свойств составило 5,7 и 10 % соответственно).

Ключевые слова: анизотропная электротехническая (трансформаторная) сталь; прокатка; волочение; гофрирование поверхности; магнитные свойства.

Одно из главных направлений дальнейшего развития энергетики — энергосбережение. В связи с этим актуальна задача минимизации удельных потерь энергии в магнитопроводах (сердечниках) трансформаторов при их перемагничивании [1].

В настоящее время сердечники трансформаторов набирают из пластин анизотропной электротехнической (трансформаторной) стали — технического магнитомягкого ОЦК сплава Fe – Si с ребровой кристаллографической текстурой (110)[001]. Качество такой стали оценивают по ее магнитным свойствам (в основном по электромагнитной индукции B_{800} и удельным магнитным потерям $P_{1,7/50}$) — чем выше B_{800} и ниже $P_{1,7/50}$, тем качественнее сталь. Эти характеристики в значительной степени зависят от совершенства (наличия субструктуры) кристаллитов (зерен) и остроты ребровой текстуры, которые формиру-

ются во время окончательного высокотемпературного отжига при вторичной рекристаллизации (аномального роста зерен). Чем совершеннее зерна (менее развита субструктура) и острее ребровая текстура, тем лучше магнитные свойства стали [2].

Кроме того, на магнитные свойства стальных полос оказывает влияние их геометрия: неплоскостность и разнотолщинность (макрогеометрия), шероховатость поверхности (микрогеометрия) [3, 4]. Например, уровень магнитных свойств готовой стали снижают напряжения, возникающие при выравнивании неплоских пластин магнитопроводов [5], и шероховатость пластин, препятствующая движению границ магнитных доменов при перемагничивании [6].

Известно, что на гофрированных в специальном штампе холоднокатаных стальных полосках во время высокотемпературного отжига при прохождении растущим зерном гребней и впадин гофров в нем образуется субструктура и меняется его кристаллографическая ориентировка (незначительные и большие отклонения (110) и [001] от плоскости и направления прокатки соответственно). Это дает основание полагать, что дефекты поверхности холоднокатаной стальной

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Магнит», № 01201463328) при частичной поддержке УрО РАН (проект № 15-9-2-33).

² Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: sych@imp.uran.ru

³ ООО «ВИЗ-Сталь», г. Екатеринбург, Россия; e-mail: olkov_sa@nlmk.com

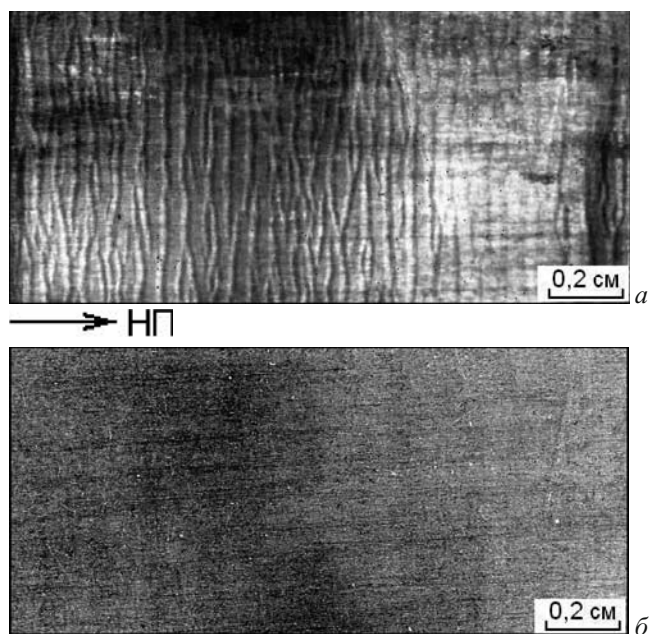


Рис. 1. Рельеф холоднокатаной стальной полосы до (а) и после проглаживания (б) (НП — направление прокатки и проглаживания)

полосы следует рассматривать не только как препятствия для перемещения границ магнитных доменов при перемагничивании, но и как источники субструктуры и снижения остроты ребровой текстуры при формировании зеренной структуры стали при вторичной рекристаллизации, что также ухудшает ее магнитные свойства.

Цель работы — оценка состояния поверхности промышленных холоднокатаных стальных полос и его влияние на их магнитные свойства, получение анизотропной электротехнической стали с гладкой поверхностью и повышенным уровнем магнитных свойств.

Исследовали анизотропную электротехническую (трансформаторную) сталь нитридно-медного способа плавки (ингибиторы — дисперсные частицы AlN и CuMn_2O_4), содержащую, % масс.: 3,00 Si; 0,30 C; 0,50 Cu; 0,01 Al; 0,01 N; 0,30 Mn; остальное Fe. Технологическая схема получения стали: горячая прокатка слабов на полосы толщиной ~2,5 мм, первая холодная прокатка полос на толщину ~0,70 мм, промежуточный отжиг на первичную рекристаллизацию и обезуглероживание (750 °C), вторая холодная прокатка полос на конечную толщину 0,23 – 0,30 мм, высокотемпературный отжиг (1150 °C) на вторичную рекристаллизацию и рафинирование металла, выпрямляющий отжиг (830 °C) с нанесением электроизоляционного покрытия.

Отжиг образцов проводили в промышленных и лабораторных печах в азотно-водородной смеси и вакууме. Основные магнитные характеристики B_{800} (измеряли при амплитуде напряженности переменного магнитного поля 800 А/м) и $P_{1,7/50}$ (измеряли при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте электромагнит-

ного поля 50 Гц) определяли на полосках размером $0,30 \times 30 \times 280$ мм с помощью установки MPG-100 (включала аппарат Эпштейна), в основе работы которой лежит индукционный метод измерения [5]. Коэрцитивную силу H_c образцов размером $0,30 \times 5 \times 100$ мм оценивали по кривым намагничивания, снятым баллистическим методом с помощью прибора на основе фотогальванометрического компенсационного микровеберметра Ф-190 при напряженности постоянного магнитного поля 6000 А/м. Рельеф поверхности (шероховатость) — с использованием бесконтактного метода сканирующей интерферометрии на оптическом профилометре Zygo Newview 7300.

При изучении поверхности прокатанных на конечную толщину полос обнаружили гофры. Их гребни и впадины, как правило, располагались перпендикулярно направлению холодной прокатки и имели волнообразную форму (рис. 1, а). Гофрирование поверхности стальной полосы обусловлено градиентом напряженно-деформированного состояния по ее сечению и стесненностью течения поверхностных слоев в конце очага деформации [7, 8].

Наблюдаемый микрорельеф неизбежно сопутствует прокатке и не имеет ничего общего с макрорельефом полосы (елочка, коробоватость и др.), причины образования которого давно известны и могут быть легко устранены определенными условиями прокатки и чистотой обработки рабочих валков [3].

Влияние гофров на движение границ магнитных доменов при перемагничивании оценивали по H_c . Сначала H_c измеряли на холоднокатаной полоске с гофрами на поверхности (см. рис. 1, а), затем — после проглаживания (протяжки полоски с небольшим обжатием на лабораторном прокатном стане кварто между приводным рабочим и опорным валками в направлении, совпадающем с направлением прокатки) и устранения рельефа (см. рис. 1, б). Получили, что проглаживание снизило H_c на 18 % (с 603,2 до 491,2 А/м).

Разработанный на основе проведенных исследований способ повышения магнитных свойств стали [9] реализовали следующим образом. Из заводской холоднокатаной стальной полосы конечной толщины вырезали ленту размером $0,3 \times 30 \times 20\,000$ мм с поверхностным рельефом (рис. 2). Наибольшая высота профиля рельефа $R_{\max}$ составила 4,5 мкм [10]. Путем протяжки (волочения) ленты с обжатием ~3 % на полупромышленном прокатном стане кварто с отключенным приводом рабочих валков с помощью моталок ее шероховатость уменьшали до $R_{\max} = 1,0$ мкм (рис. 3). Далее согласно технологии производства трансформаторной стали проводили высокотемпературный отжиг (1150 °C, 24 ч) образцов, вырезанных из проглаженных и шероховатых лент, после чего измеряли их магнитные свойства (см. таблицу).

Включение операции проглаживания после холодной прокатки на конечную толщину повысило B_{800} с

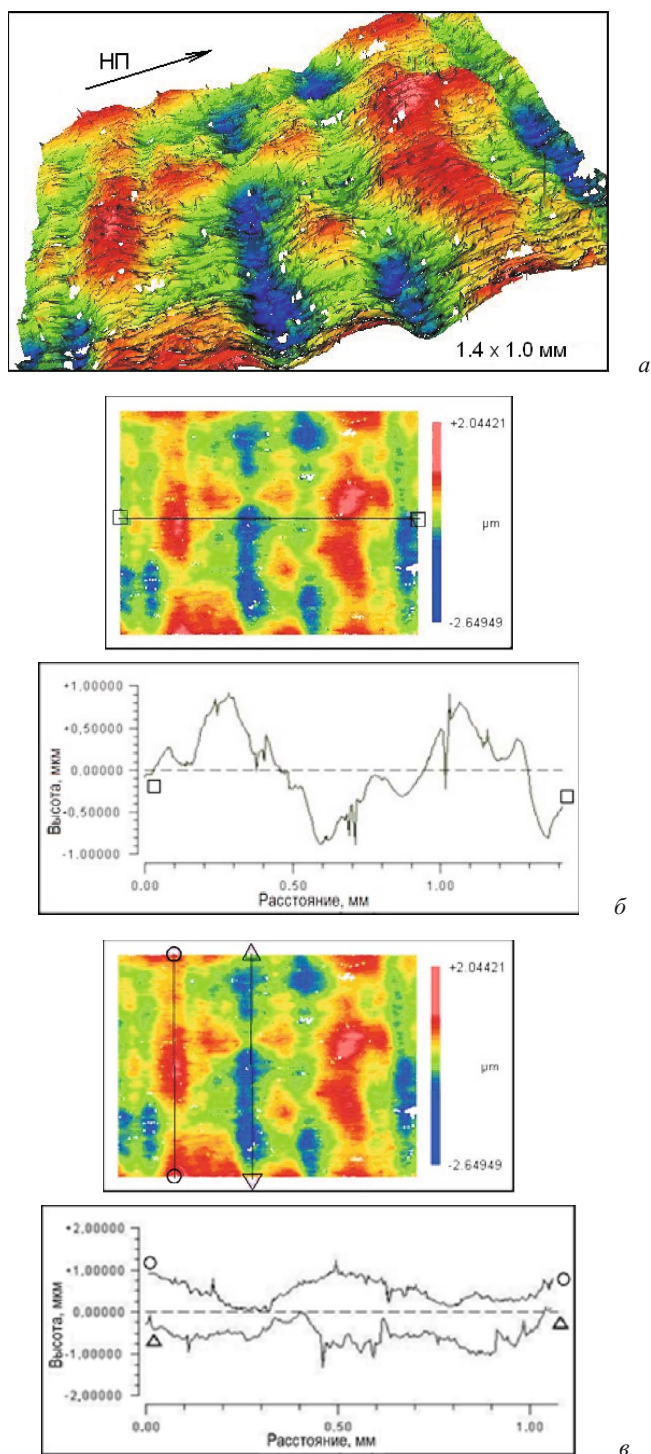


Рис. 2. Рельеф холоднокатаной стальной полосы (а) и ее профилограммы вдоль (б) и поперек НП (в)

1,82 до 1,93 Тл (5,7 %) и снизило $P_{1,7/50}$ с 1,19 до 1,07 Вт/кг (10 %). Улучшение магнитных свойств обусловлено тем, что уменьшение шероховатости (улучшение микрогеометрии) повышает совершенство зерен и остроту ребровой текстуры при высокотемпературном отжиге и позволяет более свободно двигаться границам магнитных доменов при перемагничивании готовой стали.

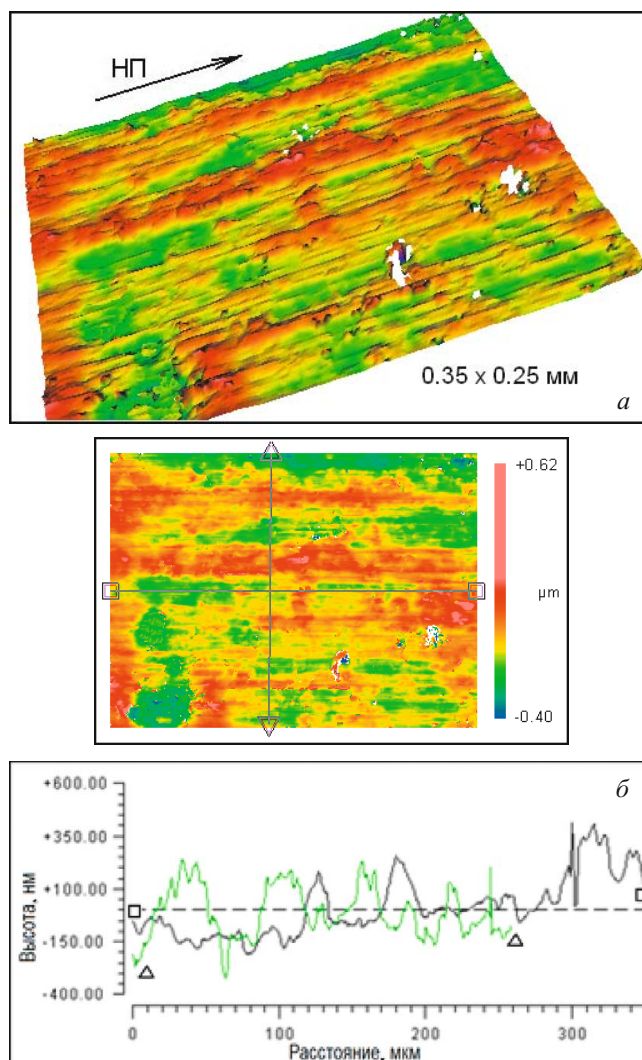


Рис. 3. Рельеф проглаженной стальной полосы (а) и ее профилограммы (б) вдоль (□) и поперек НП (△)

Влияние шероховатости на магнитные свойства анизотропной электротехнической стали толщиной 0,30 мм

Шероховатость, мкм	Магнитные свойства (среднее по пяти образцам)	
	B_{800} , Тл	$P_{1,7/50}$, Вт/кг
1,0	1,93	1,07
4,5	1,82	1,19

Отметим, что проглаживание холоднокатаной стальной полосы не только улучшает ее микро- и макрогеометрию (в частности устраняет елочку, коробоватость, разнотолщинность и др.), но и повышает магнитные характеристики.

Таким образом, поверхность холоднокатаных полос анизотропной электротехнической (трансформаторной) стали отечественного производства гофрирована. Гофрирование поверхностных слоев стальной полосы при прокатке обусловлено стесненностью течения металла в конце очага деформации.

Гофры, как и любая шероховатость, — одна из причин снижения магнитных свойств материала. Они

препятствуют движению границ магнитных доменов при перемагничивании готовой стали, а при окончательном высокотемпературном отжиге являются источниками субструктуры в растущих зернах и снижения остроты ребровой кристаллографической текстуры (110)[001].

Включение в технологическую схему производства операции проглаживания полосы, прокатанной на конечную толщину, существенно повышает ее магнитные характеристики (B_{800} на 5,7, а $P_{1,7/50}$ на 10 %). Проглаживание можно осуществить путем протяжки (волочения) полосы с небольшим обжатием ($\pm 3\%$) в направлении, совпадающем с направлением прокатки, на стане холодной прокатки при отключенном приводе рабочих валков с помощью моталок.

Авторы выражают благодарность Л. И. Наумовой за помощь в изучении рельефа поверхности образцов методом сканирующей интерферометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Редикульцев А. А., Цырин М. Б. Производство электротехнических сталей: вчера, сегодня, завтра / Черная металлургия. 2013. № 1. С. 44 – 63.
2. Лобанов М. Л., Русаков Г. М., Редикульцев А. А. Электротехническая анизотропная сталь. Ч. 1. История развития / МиТОМ. 2011. № 7. С. 18 – 25.
3. Лифанов В. Ф. Прокатка трансформаторной стали. — М.: Металлургия, 1975. — 200 с.
4. Губернаторов В. В., Сычева Т. С., Ольков С. А. К вопросу изменения ориентировки и образования субструктуры в металлических кристаллах (зернах) при миграции их границ / Физическая мезомеханика. 2011. Т. 14. № 2. С. 85 – 91.
5. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали. — М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 320 с.
6. Шур Я. С., Абельс В. Р. Исследование магнитной структуры кристаллов кремнистого железа методом порошковых фигур / ФММ. 1955. Т. 1. № 1. С. 11 – 17.
7. Губернаторов В. В., Соколов Б. К., Гervасьева И. В., Владимиров Л. Р. О формировании полосовых структур в структурно-однородных материалах при деформации / Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1 – 2. С. 157 – 162.
8. Губернаторов В. В., Владимиров Л. Р., Сычева Т. С., Долгих Д. В. Явление гофрирования и формирование структуры и текстуры в металлических материалах при деформации и рекристаллизации: 1. Геометрическая модель пластического течения структурно-однородных сред при прокатке / Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 5. С. 97 – 101.
9. Пат. № 2621205 РФ, МПК C21D 8/12, B21B 1/28. Способ производства электротехнической стали / Губернаторов В. В., Сычева Т. С., Ольков С. А.; заявитель и патентообладатель ФГБУН Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН (ИФМ УрО РАН). № 2015150157; заявл. 23.11.2015; опубл. 01.06.2017. Бюл. № 16.
10. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. — М., 1975. — 6 с.

UDC 538.911

THE IMPACT OF THE STRIP GEOMETRY ON THE MAGNETIC PROPERTIES OF ANISOTROPIC ELECTRICAL SHEET STEEL

© V. V. Gubernatorov, T. S. Sycheva, and S. A. Ol'kov

Submitted February 15, 2017.

The impact of the geometry (mainly the surface roughness) of cold rolled strips of anisotropic electrical (transformer) steel of domestic production (technical soft magnetic bcc alloy Fe – 3 wt.% Si with an edge crystallographic texture (110)[001]) on the magnetic properties (particularly on electromagnetic induction B_{800} and specific magnetic losses $P_{1,7/50}$) is studied. It is shown that corrugations are formed on the surface of steel strips during cold rolling to a final thickness of 0.23 – 0.30 mm with a reduction of 50 – 70%. As a rule, their ridges and valleys are perpendicular to the direction of rolling and have a wavy form. Formation of the relief is attributed to the gradient of the stress-strain state along the cross section of the strip and to the tightness of the flow of the surface layers at the end of the deformation region and inevitably accompanies the rolling process. The presence of corrugations like any other roughness on the strip surface reduces B_{800} and increases $P_{1,7/50}$. We propose a method for elimination of the surface defects (including corrugations) of cold rolled steel strips after cold rolling, i.e., ironing, which can be carried out by drawing of strips with a small draft (~3%) in cold rolling mills with a disconnected work roll drive using coilers. Introduction of drawing into the transformer steel manufacture technology improves the magnetic properties of steel due to increased perfection of the crystallites (grains), increased sharpness of the edge(110)[001] texture and free movement of the boundaries of magnetic domains upon magnetic reversal. Ironing of the steel strips of nitride-copper melt (inhibitors — dispersed particles of AlN and CuMn_2O_4) with a thickness of 0.30 mm increased B_{800} up to 1.93 T and decreased $P_{1,7/50}$ to 1.07 W/kg (thus improving the magnetic properties by 5.7 and 10%, respectively). The resulted properties of domestic steel production are not inferior to those of foreign steel.

Keywords: anisotropic electrical (transformer) steel; rolling; drawing; surface corrugation; magnetic properties.

REFERENCES

1. Redikul'tsev A. A., Tsyrlin M. B. Manufacture of electrotechnical steels: yesterday, today, tomorrow / Chern. Metallurg. 2013. N 1. P. 44 – 63 [in Russian].
2. Lobanov M. L., Rusakov G. M., Redikul'tsev A. A. Electrotechnical anisotropic steel. Part 1. History of development / Metalloved. Term. Obrab. Met. 2011. N 7. P. 18 – 25 [in Russian].
3. Lifanov V. F. Transformer steel rolling. — Moscow: Metallurgiya, 1975. — 200 p. [in Russian].

4. **Gubernatorov V. V., Sycheva T. S., Ol'kov S. A.** To the problem of orientation variation and substructure formation in metallic crystals (grains) at their boundaries migration / *Fiz. Mezomekh.* 2011. Vol. 14. N 2. P. 85 – 91 [in Russian].
5. **Druzhinin V. V.** Magnetic properties of an electrotechnical steel. — Moscow – Leningrad: Gosénergoizdat, 1962. — 320 p. [in Russian].
6. **Shur Ya. S., Abel's V. R.** Research of magnetic structure of siliceous iron crystals by powder figures method / *Fiz. Met. Metalloved.* 1955. Vol. 1. N 1. P. 11 – 17 [in Russian].
7. **Gubernatorov V. V., Sokolov B. K., Gervas'eva I. V., Vladimirov L. R.** About formation of strip structures in structurally-homogeneous materials at deformation / *Fiz. Mezomekh.* 1999. Vol. 2. N 1 – 2. P. 157 – 162 [in Russian].
8. **Gubernatorov V. V., Vladimirov L. R., Sycheva T. S., Dolgikh D. V.** The corrugation phenomenon and formation of structure and texture in metallic materials at deformation and recrystallization: 1. Geometrical model of plastic current structurally-homogeneous medium at rolling / *Fiz. Mezomekh.* 2001. Vol. 4. N 5. P. 97 – 101 [in Russian].
9. RF Pat. No. 2621205, MPK S21D 8/12, V21V 1/28. Production method of electrical steel / Gubernatorov V. V., Sycheva T. S., Ol'kov S. A.; applicant and owner M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IMP UB RAS). No. 2015150157; appl. 23.11.2015; publ. 01.06.2017. Byull. Otkryt. Izobret. 2017. N 16 [in Russian].
10. State Standard GOST 2789–73. Surface roughness. Parameters and characteristics. — Moscow, 1975. — 6 p. [in Russian].